

A FÍSICA PARA O DESENVOLVIMENTO EQUILIBRADO

UM CONTRIBUTO

Organizadores

Nilson Marcos Dias Garcia

Maria da Conceição Abreu

Organizadores

Nilson Marcos Dias Garcia

Maria da Conceição Abreu

A FÍSICA PARA O DESENVOLVIMENTO EQUILIBRADO: UM CONTRIBUTO

2021

Sociedade Portuguesa de Física
Sociedade Brasileira de Física
União dos Físicos de Países de Língua Portuguesa

Projeto gráfico: Reinaldo Cezar Lima

Editoração eletrônica e revisão: Reinaldo Cezar Lima

Capa: Filipa Palet

Comitê editorial:

Nilson Marcos Dias Garcia

Maria da Conceição Abreu

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

F537 A física para o desenvolvimento equilibrado : um contributo / organizado-
res : Nilson Marcos Dias Garcia, Maria da Conceição Abreu. -- São Paulo,
SP : Sociedade Brasileira de Física ; Lisboa, Portugal : Sociedade Portuguesa de
Física : União dos Físicos de Países de Língua Portuguesa, 2021.
426 p. : il.

Disponível também via World Wide Web

Inclui bibliografias

ISBN: 978-85-89064-34-7

e-ISBN: 978-85-89064-37-8

1. Física. 2. Física - Países de língua portuguesa. 3. Física - Aspectos da
saúde. 4. Energia. 5. Nanotecnologia. 6. Física - Fatores climáticos. 7. Física
- Estudo e ensino. 8. Desenvolvimento sustentável. I. Garcia, Nilson Marcos
Dias. II. Abreu, Maria da Conceição. III. Título.

CDD: ed. 23 -- 530

Biblioteca Central da UTFPR, Câmpus Curitiba
Bibliotecário: Adriano Lopes CRB-9/1429



SUMÁRIO

PREFÁCIO.....	5
MENSAGEM UFPLP.....	9
APRESENTAÇÃO.....	11
LAAAMP: LIGHTSOURCES FOR AFRICA, THE AMERICAS, ASIA AND MIDDLE EAST PROJECT	13
<i>LAAAMP</i> ENTERS YEAR FOUR.....	15
FÍSICA PARA A SAÚDE	25
A FÍSICA NA SAÚDE: CAMINHOS PROFISSIONAIS E TENDÊNCIAS	27
PRINCÍPIOS E PRÁTICAS DE RADIOPROTEÇÃO E SUA APLICAÇÃO NA DOSIMETRIA PESSOAL.....	35
APLICAÇÕES DE FÍSICA MÉDICA NUMA UNIDADE HOSPITALAR DE LUANDA	59
FÍSICA E ENSINO	73
A INFLUÊNCIA DO USO DAS FERRAMENTAS DO MATLAB NA COMPREENSÃO DE RADIAÇÃO DE ONDAS ELETROMAGNÉTICAS E ANTENAS	75
UM MOOC COM UMA EXPERIÊNCIA REMOTAMENTE CONTROLADA E-LAB: ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DOS ALUNOS	89
SISTEMA DE CONCEITOS FÍSICOS RELACIONADOS COM O CONCEITO DE MOVIMENTO MECÂNICO	103
FÍSICA DO PRESENTE E FUTURO – FORMAÇÃO PARA PROFESSORES EM LÍNGUA PORTUGUESA NO CERN	115
CLUBE DE CIÊNCIA, TECNOLOGIA E AMBIENTE.....	131
ESTUDO E APLICAÇÃO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO ISOLADO COMO FONTE DE ENERGIA ELÉTRICA.....	137
O LIVRO DIDÁTICO DE FÍSICA E DE CIÊNCIAS COMO OBJETO DE INVESTIGAÇÃO.....	157
ESCOLHA DE LIVROS DIDÁTICOS POR PROFESSORES DE FÍSICA: CULTURA ESCOLAR E MERCADORIA.....	171
A PARTICIPAÇÃO DE SÃO TOMÉ E PRÍNCIPE NAS MASTERCLASSES INTERNACIONAIS DE FÍSICA DE PARTÍCULAS.....	183

PROGRAMA MEDEA – 10 ANOS A PROMOVER A LITERACIA EM CAMPOS MAGNÉTICOS E ELÉTRICOS DE BAIXA FREQUÊNCIA	189
--	-----

ENERGIA.....197

PERSPECTIVAS DE USO PRÁTICO DO EFEITO TERMOVOLTAICO DE KAMINSKII.....	199
QUALIDADE DA ENERGIA ELÉCTRICA NO CAMPUS DA UNIVERSIDADE AGOSTINHO NETO	211
CÉLULAS SOLARES DE MULTIJUNÇÃO BASEADAS EM SILÍCIO CRISTALINO	219
ENERGIAS RENOVÁVEIS NOS PAÍSES AFRICANOS DE LÍNGUA PORTUGUESA: SITUAÇÃO ATUAL E PERSPETIVAS.....	231
MEDINDO A POBREZA ENERGÉTICA EM MOÇAMBIQUE	243

AMBIENTE E CLIMA.....271

CARACTERIZAÇÃO SISMOTECTÓNICA DA REGIÃO DE ARRAIOLOS, SUL DE PORTUGAL	273
TOMOGRAFIA DE REFRAÇÃO SÍSMICA APLICADA À ESTIMATIVA DO VOLUME DE SEDIMENTOS CONTAMINADOS POR METAIS PESADOS. O CASO DO CÔRREGO CONSCIÊNCIA-BRASIL	285
AVALIAÇÃO DO RISCO DO RADÃO PRESENTE NA ÁGUA POTÁVEL DO MUNICÍPIO DA BIBALA.....	299
ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS EM ANGOLA: UMA ABORDAGEM EM SALA DE AULA.....	309
IMPORTÂNCIA DAS OBSERVAÇÕES SISMOLÓGICAS NAS ILHAS - OS CASOS DOS AÇORES, MADEIRA, CABO VERDE E REUNIÃO	323
O CLIMA DA ÁFRICA AUSTRAL SOB 1,5°C E 2°C DE AQUECIMENTO GLOBAL, CONFORME SIMULADO PELOS MODELOS CLIMÁTICOS REGIONAIS DO <i>CORDEX</i>	337

FÍSICA DO MACRO E DO MICRO.....355

GASES QUÂNTICOS ULTRAFRIOS: UM BREVE HISTÓRICO COM ÊNFASE NA CONTRIBUIÇÃO BRASILEIRA.....	357
ALGUNS ASPECTOS BÁSICOS CIENTÍFICOS E TECNOLÓGICOS DE SISTEMAS NANOSCÓPICOS.....	373
FÍSICA NUCLEAR NAS ESTRELAS	393

SOBRE OS AUTORES.....401

AUTORES	403
---------------	-----

PREFÁCIO

A Comunidade de Países de Língua Portuguesa (CPLP), formada por nove países localizados em quatro continentes - Angola, Brasil, Cabo Verde, Guiné-Bissau, Guiné-Equatorial, Moçambique, Portugal, São Tomé e Príncipe e Timor-Leste – tem uma população de mais de 280 milhões de habitantes que, apesar de viverem em regiões com diferenças naturais, persistem numa unidade cultural proporcionada pela língua que inspirou toda uma plêiade de escritores, poetas, pensadores e cientistas de projeção mundial.

Um dos campos férteis para o desenvolvimento de inovação tecnológica com base científica nesses países é a Física. Assim, com o objetivo de reunir cientistas, professores, engenheiros e empresários dessa Comunidade, foram organizadas as Conferências de Física da Comunidade dos Países de Língua Portuguesa (CF-CPLP), visando estimular a troca e a discussão científica das áreas importantes e significativas da Física nesses países.

Cada um dos países membros da CPLP é caracterizado por pontos de excelência científica e a Conferência tem sido uma plataforma propícia para o compartilhamento de conhecimento num esforço de desenvolvimento comum, proporcionando uma forte interação entre as pessoas, abrindo um espaço para a discussão de trabalhos, problemas e soluções comuns, favorecendo o estabelecimento de redes de cooperação e parcerias. Ela é um fórum para a formação e a atualização de conhecimentos dos professores do ensino secundário (médio), propiciando o intercâmbio entre escolas e professores, informações sobre fabricação de instrumentos de baixo custo, assistência em linha para dificuldades técnicas individuais e o desenvolvimento de técnicas adaptadas a países em desenvolvimento.

A 1ª Conferência de Física da Comunidade de Países de Língua Portuguesa, 1ª CF-CPLP, foi realizada na Universidade Eduardo Mondlane, em Maputo, capital da República de Moçambique, entre 12 e 16 de setembro de 2010. O tema dessa primeira Conferência foi **O papel da Física e das suas aplicações na educação e no desenvolvimento nos países de língua portuguesa**. Nela discutiu-se a formação em Física para um desenvolvimento sustentado, o papel da cultura para a inserção de professores e investigadores nos diferentes esquemas da utilização do conhecimento, permitindo a distinção entre o saber e o saber fazer no contexto social onde se exerce o conhecimento. A Conferência foi conduzida como um fórum, organizado em sessões plenárias convidadas, sessões orais e cartazes (painéis), e permitiu a cientistas, professores e industriais discutirem em conjunto seus trabalhos e as tendências em áreas de grande interesse para o desenvolvimento da CPLP.

A 2ª Conferência de Física da Comunidade de Países de Língua Portuguesa foi realizada no Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas – CBPF, no Rio de Janeiro, Brasil, de 10 a 12 de setembro de 2012. Nela foi dada prioridade a quatro eixos temáticos, nos quais já havia um histórico de colaborações entre os países da CPLP, com o objetivo de estabelecer novas colaborações e fortalecer as já existentes, nomeadamente: a) Física Nuclear e de Partículas Elementares, b) Física de Plasmas, c) Física da Matéria Condensada e Nanotecnologia e d) Educação e Atividades de Extensão em Física. O tema Ensino de Física recebeu atenção especial, com discussões que visaram compartilhar experiências, métodos e materiais didáticos necessários para capacitar devidamente professores de Física nos vários países da comunidade.

Após o sucesso da Conferência no Rio de Janeiro, foi agendada a seguinte, em Cabo Verde, em 2014, para consolidar o processo de dois em dois anos, passando pelos vários países envolvidos. Por razões várias, esta edição não veio a se realizar. O local seguinte seria provavelmente Portugal e a Conferência realizada em 2016, mas a Sociedade Portuguesa de Física – SPF – estava no começo da preparação das Olimpíadas Internacionais de Física, que teriam lugar em 2018 em Lisboa, evento este que exigiria uma grande organização e apoios financeiros devido à sua dimensão.

As várias dúvidas quanto à localização e à responsabilidade pela organização levaram a que o processo de organização do evento em 2016 fosse protelado. Ao findar o ano de 2018, a SPF entendeu, em sintonia com a Sociedade Brasileira de Física - SBF, que realizar a 3ª Conferência de Física por ocasião da celebração, em 2019, do centenário da Observação do Eclipse Total do Sol na Ilha do Príncipe e também no Brasil, na cidade de Sobral, no Ceará, seria uma oportunidade excelente para retomar as Conferências de Física e que o local era óbvio: São Tomé e Príncipe. A ideia foi acolhida com enorme entusiasmo pela Universidade de São Tomé e Príncipe, nas pessoas do seu Reitor, o Professor Aires Bruzaca, e dos professores Manuel Penhor e Lúcio Carvalho.

Este interesse e o apoio que dele resultou transvasaram a Universidade e recolheram o entusiasmo do Diretor do Ensino Secundário, do Instituto de Meteorologia, do Instituto Marquês Vale Flor (IMVF), que apoia o Hospital Dr. Ayres de Menezes, e da Escola Portuguesa de São Tomé e Príncipe. A decisão em cima da hora não permitiu o apoio financeiro de instituições internacionais, como a European Physical Society (EPS) e a International Union of Pure and Applied Physics (IUPAP), mas esta última demonstrou o seu interesse pelo evento e esteve representada pelo presidente da 13ª Comissão – Physics for Development, Dr. Sekazi Mtwinga. A Conferência teve o apoio institucional do Alto Patrocínio do Presidente da República de São Tomé e Príncipe, da CPLP e do Instituto Camões. A conferência passou então a designar-se Conferência de Física dos Países de Língua Portuguesas (CF PLP), dado

que “Comunidade de Países de Língua Portuguesa - CPLP” é uma designação oficial de uso restrito.

A 3ª Conferência de Física realizou-se sobre o lema a **Física para o Desenvolvimento Equilibrado**, tendo como fato inovador a inclusão do tema Física para a Saúde, com o apoio de cooperantes do Instituto Marquês Vale Flor e de profissionais do Departamento de Radiologia e Imagiologia do Hospital Dr. Ayres de Menezes, destacando-se a médica radiologista cooperante Dr^a. Celeste Alves e todos os técnicos de radiologia e enfermeiros do serviço que participaram no evento. Assim, Física para a Saúde, Física e Ensino, Energia, Ambiente e Clima, e Nanotecnologia, foram os temas da 3ª CF PLP.

A Conferência recebeu apoio de diversas empresas, que ajudaram a viabilizar a sua realização. Em especial a GALP, que apoiou a participação de cientistas e alunos de pós-graduação e as Redes Energéticas - REN, que apoiou a divulgação do projeto MEDEA - o eletromagnetismo ao nosso redor. O apoio das sociedades científicas Sociedade Portuguesa de Física e Sociedade Brasileira de Física também foi fundamental para que a Conferência contasse com um número significativo e representativo de participantes, principalmente de jovens estudantes de pós-graduação e investigadores juniores.

Os participantes da 3ª CF PLP mostraram-se muito interessados em que houvesse uma memória deste evento, para além das Atas. Assim, resolveu-se publicar em formato de livro os artigos dos trabalhos apresentados durante a Conferência. Esta ideia foi bem acolhida pelos responsáveis da organização da 3ª CF PLP, nomeadamente pelas SPF e SBF. O presente livro deixa registradas as discussões que ocorreram durante a 3ª Conferência de Física em São Tomé e Príncipe, como forma de torná-las públicas para toda a comunidade de físicos de língua portuguesa que não puderam nela estar presentes. Este registo certamente propiciará frutos e poderá guiar as próximas edições das Conferências de Físicos dos Países de Língua Portuguesa.

Assim, aqui estamos com muito gosto a prefaciá-lo o registo do conteúdo da Conferência, referindo o seu percurso na perspectiva de que outras edições se seguirão e outros livros surgirão.

Maria da Conceição Abreu
Sociedade Portuguesa de Física

Marcos Pimenta
Sociedade Brasileira de Física

MENSAGEM DA UNIÃO DOS FÍSICOS DE PAÍSES DE LÍNGUA PORTUGUESA

A ideia de se criar uma entidade que possibilitasse aos físicos falantes de português compartilhar suas investigações e resultados entre si tem sido acalentada há algum tempo. O berço dessa intenção têm sido as Conferências de Física dos Países de Língua Portuguesa – CFPLP. Nestas, a produção científica tem sido compartilhada pelos participantes no nosso idioma pátrio comum, que é o português.

O amadurecimento dessa proposição ocorreu no ano de 2019, durante a 3ª Conferência de Física dos Países de Língua Portuguesa, em São Tomé. Nesta, realizou-se uma reunião onde as bases dessa nova entidade foram delineadas. Criada uma comissão com representantes dos diversos países participantes, depois de um intenso trabalho, a proposta tomou corpo e forma.

Assim, no lindo Palácio Penafiel em Lisboa, sede da Comunidade de Países de Língua Portuguesa – CPLP, em 15 de novembro de 2019 foi realizada a Assembleia de fundação da União dos Físicos de Países de Língua Portuguesa – UFPLP – como consequência imediata da experiência, dos contactos e da coordenação decorrentes dessa série de Conferências.

Instituída com sede em Lisboa, a UFPLP, cujos Estatutos, Órgãos Sociais, Planos de Trabalho e Relatórios da UFPLP estão disponíveis no sítio *ufplp.org*, foi criada com os seguintes objetivos:

1. Desenvolver e propiciar as condições favoráveis a um ambiente de união entre os membros e de solidariedade entre os Físicos dos países e territórios associados, com vista à criação de oportunidades e condições condignas para a afirmação do exercício da profissão;
2. Cooperar, nos diversos domínios da Física em que se desenvolva a atividade profissional do Físico, para o desenvolvimento cultural, científico, tecnológico e económico dos diferentes países e territórios, sob o princípio da primazia e da defesa dos interesses superiores dos seus povos, em especial os mais desfavorecidos em termos de infraestruturas de ensino e investigação;
3. Possibilitar canais para as relações de colaboração recíprocas e com as Organizações Internacionais de carácter profissional e cultural, potenciando redes de colaboração e influência;
4. Contribuir para a promoção e a defesa do património histórico e da atividade profissional do Físico e, em geral, favorecer toda a atividade que se prenda com o fortalecimento dos elementos de identidade cultural que os unem.

Dentre as diversas responsabilidades da UFPLP, destaca-se a organização das futuras edições da CFPLP, razão do porquê cumprimentarmos a publicação do presente livro, *A Física para o desenvolvimento equilibrado: um contributo*, que contempla os trabalhos que foram apresentados na 3ª Conferência de Física dos Países de Língua Portuguesa, realizada em 2019 em São Tomé. Estamos também orgulhosos de já poder anunciar a 4ª Edição da CFPLP, a ser realizada na Cidade da Praia, Cabo Verde, de 12 a 16 de setembro de 2022.

Convidamos a todos a participarem das atividades da UFPLP e esperamos vê-los em Cabo Verde em 2022 para celebrar a Física em Países de Língua Portuguesa!

Rogério Rosenfeld
Presidente da União dos Físicos de
Países de Língua Portuguesa – UFPLP

APRESENTAÇÃO

Uma das decisões tomadas no encerramento da 3ª Conferência de Física dos Países de Língua Portuguesa foi encetar esforços no sentido de organizar e divulgar as contribuições que foram dadas pelos participantes naquele que está se constituindo num dos importantes eventos em que físicos dos países falantes em língua portuguesa compartilham e discutem suas experiências nos mais diversos campos em que a Física se destaca em seus países. Dessa forma, ressaltavam os participantes, essas pesquisas poderiam ser publicizadas de modo a atingir um universo maior do que aquele restrito ao evento e contribuir para a história destes eventos.

O presente livro reúne, em textos ampliados, as comunicações apresentadas na Conferência. Além disso, visando dar mais amplitude a essa divulgação, optou-se por apresentar, juntamente como o texto escrito em português, um resumo expandido em inglês, o que possibilitará que um número maior de interessados possa ter acesso ao que está sendo produzido pelos pesquisadores participantes.

O tema do evento, “A Física para o desenvolvimento equilibrado”, foi tomado como título do livro, a que acrescentamos apenas *Um Contributo*, na convicção que as futuras conferências continuarão decerto a realçar o papel que a Física desempenha no desenvolvimento das nossas sociedades. Assim, as temáticas abordadas neste livro, atendendo por vezes a demandas locais e regionais, representam alguns dos interesses comuns por ocasião da 3ª Conferência de Física.

Um desses interesses remete às diversas questões relacionadas com o Ensino de Física. Discutindo experiências e resultados de pesquisas que permitem uma maior participação de alunos e professores em Olimpíadas de Física, no uso compartilhado de e-laboratórios, além de aspectos conceituais que envolvem as questões de ensino em todo o espaço dos países falantes de língua portuguesa, os textos mostram a preocupação com o ensino dessa disciplina nos diversos países.

A questão da Energia não poderia deixar de ser contemplada nos textos aqui apresentados. É premente a discussão a respeito da utilização racional da energia, como também a busca por novas formas de sua produção que respeitem uma exploração sustentável e que sejam voltadas para oferecer todos os seus benefícios para as comunidades, principalmente as mais carentes. A contribuição dada pela Física e pelos novos materiais para a consecução desses objetivos tem-se mostrado relevante, o que se comprovou pelos diversos trabalhos e projetos apresentados pelos participantes.

Todas essas questões não poderiam deixar de levar em conta as preocupações atuais referentes aos processos relacionados com o Clima e o Meio

Ambiente, principalmente pelas alterações climáticas que estão afetando as florestas, os oceanos e as terras das mais diversas partes do globo. Nesse particular, é sensível o papel da Física, fazendo previsões e indicando possíveis soluções para mitigar os efeitos das mudanças nos seus aspectos macroscópicos. No outro extremo, no mundo microscópico, é também significativa a contribuição da Física nos processos relacionados à Nanotecnologia, aspecto que também é contemplado em pesquisas dos participantes.

Finalmente, também de maior importância é a contribuição da Física para a Saúde. Seja pelo desenvolvimento de equipamentos, protocolos e procedimentos relativos aos processos que envolvem a saúde das populações, as pesquisas relacionadas à Proteção Radiológica e à Imageologia Médica ocupam papel de destaque nos textos aqui apresentados.

Por não estarmos isolados no mundo, é também missão destas Conferências fortalecer e dar a conhecer projetos em curso que transcendam o território dos falantes da língua portuguesa, mas interessam à nossa comunidade por razões geográficas, como o projeto LAAAMP, sediado no Ruanda. O capítulo LAAAMP completa quatro anos detalha o esforço de melhorar, nomeadamente na África, Caraíbas, México, Sudeste Asiático e Médio Oriente, a utilização de fontes avançadas de luz e cristalografia. Ao registrar os quatro anos do Projeto, enumera as diversas atividades junto aos diversos grupos de pesquisas desses países e regiões.

Constituindo-se num de seus objetivos, o presente livro permite uma visão do que se está produzindo em termos de Física nos Países de Língua Portuguesa. Sim, nós produzimos ciência e tecnologia, e de qualidade.

Esperamos que a sua publicação permita laços e parcerias académicas para que a ciência produzida seja mais um dos elos entre os pesquisadores falantes de português. E que as futuras Conferências de Física dos Países de Língua Portuguesa continuem a aprofundar o contributo da Física para o bem-estar da comunidade.

Os organizadores

LAAAMP

**Lightsources for Africa, the Americas,
Asia and Middle East Project**

LAAAMP ENTERS YEAR FOUR

LAAAMP COMPLETA QUATRO ANOS

Sekazi K. Mtingwa¹

Sandro Scandolo²

Michele Zema³

ABSTRACT

We describe an initiative funded by a 3-year, 300K-Euro grant from the International Science Council (ISC) to the International Union of Pure and Applied Physics (IUPAP) and International Union of Crystallography (IUCr) in collaboration with over 30 partner organizations that include 16 advanced light sources to enhance the utilization of advanced light sources and crystallography in five targeted regions of the world, namely Africa, the Caribbean, Mexico, Southeast Asia, and Middle East. *LAAAMP*'s programs include the development of a Strategic Plan for each region; a Colloquium program that sends experienced light source and crystallography users to those regions; establishment of new IUCr-UNESCO Crystallography OpenLabs; design and distribution of a Brochure that describes advanced light sources and crystallography for government officials and the public; 2-month Faculty-Student (FAST) Team training visits to advanced light sources, with approximately 30 new users participating in 2019; and culminating in a December 2019 report to the World Science Forum 2019 in Budapest, Hungary to chart a path forward beyond the ISC grant.

RESUMO

Descreve-se a iniciativa *LAAAMP* da União Internacional de Física Pura e Aplicada (IUPAP) e da União Internacional de Cristalografia (IUCr), que atuaram em colaboração com mais de 30 organizações parceiras que operam 16 fontes avançadas de luz, com o objetivo de melhorar, em cinco regiões-alvo do mundo, nomeadamente África, Caraíbas, México, Sudeste Asiático e Médio Oriente, a utilização de fontes avançadas de luz e cristalografia. Esta iniciativa foi financiada por uma subvenção do Conselho Científico Internacional (ISC), no montante de 300k Euros ao longo de três anos. Os programas do *LAAAMP* incluem o desenvolvimento de um Plano Estratégico para cada região; um programa Colloquium que envia utilizadores experientes de fontes de luz e cristalografia para essas regiões; o estabelecimento de novos OpenLabs de Cristalografia IUCr-UNESCO; a concepção e a distribuição de uma brochura que descreve fontes de luz avançadas e cristalografia para funcionários governamentais e o público; visitas de formação de dois meses da Equipa Docente-Estudante (FAST) a fontes de luz avançadas, com a participação de aproximadamente 30 novos utilizadores em 2019; e culminando num relatório apresentado em dezembro de 2019 ao Fórum Mundial da Ciência de 2019 em Budapeste, Hungria, para traçar um caminho para além da subvenção do ISC.

¹ Chair, *LAAAMP* Executive Committee. Chair, IUPAP C13 Commission on Physics for Development.

² *LAAAMP* Executive Committee. Senior Scientist, Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics.

³ *LAAAMP* Executive Committee. IUCr Executive Outreach Officer.

INTRODUCTION

Lightsources for Africa, the Americas, Asia and Middle East Project (*LAAAMP*) just closed out its third year of operations and is off to a fast start in Year 4. *LAAAMP*'s targeted regions are Africa, Mexico, the Caribbean, Southeast Asia, and Middle East. At conception, *LAAAMP* identified five tasks to pursue, namely (1) conduct a survey of crystallography and advanced light source (AdLS) users in the targeted regions and develop a **Strategic Plan** for each; (2) send seasoned AdLS users to the targeted regions under the **Colloquium Programme** to enhance researchers' knowledge of crystallography and AdLSs and how they can be of benefit in their research and training of students, and become a partner in the launch of IUCr-UNESCO-*LAAAMP* OpenLabs, which is a network of operational crystallography laboratories in developing countries; (3) develop and disseminate an informational, nontechnical brochure that explains the tremendous dividends derived from crystallography and AdLS research and training; (4) send **Faculty-Student (FAST) Teams** to any of the sixteen AdLS partners around the world for two months of training, mainly on the beamlines, and when possible, allow them to continue the training for another two months the following year; and finally (5) provide a report at the *World Science Forum 2019* in Budapest, Hungary that describes the five regions' *Strategic Plans* and launch more detailed *Business Plans* that include feasibility studies of constructing AdLSs in regions where they do not currently exist.

SURVEY OF CRYSTALLOGRAPHY AND AdLS USERS

Year 3 began with a major push on concluding the survey, which is posted on the *LAAAMP* Website at <https://laaamp.iucr.org/>. To assist in this effort, Dorian Bohler, a staff physicist at the SLAC National Accelerator Laboratory, joined the *LAAAMP* team to identify those researchers in the targeted regions who should submit responses to the survey and assist with the development of the *Strategic Plans* in the regions.

X-TECHLAB

A huge success of the Colloquium Programme stems from Thierry d'Almeida's visit to his home country of Benin. A member of the *LAAAMP* Steering Committee and currently employed as a senior research engineer at France's Commissariat à l'Energie Atomique, d'Almeida traveled to Benin during 30 April to 7 May 2018 to deliver a series of lectures on AdLSs, related

techniques and their relevance to specific issues of interest in Africa, and his own synchrotron-based research. Jean-Pierre Ezin, a member of *LAAAMP*'s Regional Committee for Africa and former African Union Commissioner for Human Resources, Science and Technology, arranged for the venues of the lectures to be the Institut de Mathématiques et Sciences Physiques (IMSP) in Porto-Novo and the Université de Abomey-Calavi (UAC) in Cotonou.



FIGURE 1. Thierry d'Almeida Addresses Benin President Patrice Talon's Cabinet.
(Photo Courtesy of Government of Benin)

While in Benin, d'Almeida met Claude Borna, who is Scientific Advisor to Benin's President Patrice Talon. She arranged for d'Almeida to return to Benin for a one-hour meeting on 12 September 2018 with President Talon and his Cabinet. Fig. 1 shows d'Almeida addressing President Talon's Cabinet. Borna also arranged for d'Almeida to meet with President Talon two days prior to that meeting, during which time he acquainted President Talon with various initiatives, including *LAAAMP*, the African Light Source, and his own idea to establish a crystallography training program in Benin to benefit students from Benin and neighboring countries. The latter idea, which d'Almeida dubbed X-TechLab, highly impressed President Talon, who indicated that that is precisely the kind of initiative that he has been seeking, and hence pledged his government's support for the project. Subsequently, X-TechLab was allocated space in Sèmè City, which is between Cotonou and Porto-Novo and is being established as a high-tech hub for Benin.

According to d'Almeida, the mission of X-TechLab is to create a center of training for a new generation of crystallographers. Students participating in X-TechLab will train for 2 weeks, twice per year. Approximately 50 IMSP students will train, with an additional 60 students from UAC and other institutions both from inside Benin and neighboring countries, such as Nigeria, Togo, Niger and Burkina Faso, for a total of approximately 110 Masters and Ph.D. students per year. With support from *LAAAMP*, the government of Benin, and the World Bank's *Africa Higher Education Centres of Excellence (ACE)* program, d'Almeida; Marielle Agbahoungbata, XTech-SD Co-Leader; Ezin; and one of the authors (MZ) have worked with many others to offer the first training school in 18-29 May 2019 and the second in 18-30 November 2019 that covered crystallography/X-ray diffraction and tomography/mathematical engineering.

***LAAAMP* BROCHURE**

The brochure, with Ernie Malamud serving as Editor, is entitled *Advanced Light Sources and Crystallography: Tools of Discovery and Innovation*, and is available on the *LAAAMP* Website in English, Portuguese, Spanish, French and Arabic, with the International Atomic Energy Agency (IAEA) donating the latter four translations. Fig. 2 shows the cover of the brochure. Hardcopies have been in great demand at conferences. Indeed the brochure has been extremely helpful in educating the public and governmental officials about the tremendous benefits derived from crystallography and AdLSs.

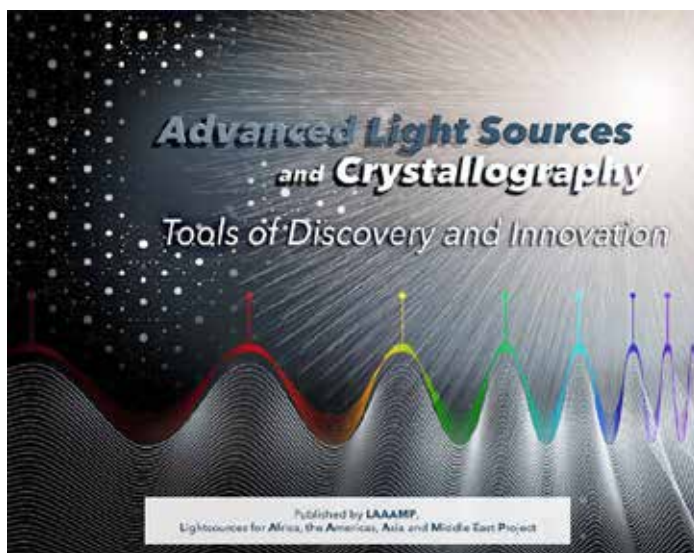


FIGURE 2. Cover of *LAAAMP* Brochure.

COLLABORATIVE ACTIVITIES

LAAAMP FAST TEAM PROGRAM

Perhaps the most high-profile *LAAAMP* initiative is its (Faculty-Student) FAST Team program. For this, *LAAAMP* disseminates a solicitation each year calling for faculty with less than a year's experience with AdLSs to apply with a Ph.D. student to spend two months at one of the 16 *LAAAMP* AdLS partners. *LAAAMP* provides airline tickets and partial meal expenses, while the AdLSs provide housing and additional partial meal expenses. One of the authors (SS) oversees the travel arrangements through the Travel Office of the Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics. During 2019, *LAAAMP* and the AdLSs awarded 14 FAST Teams, and they anticipate supporting at least 10 FAST Teams in 2020. Where possible, *LAAAMP* allows previous awardees to participate for another two months during the year following the first award.



FIGURE 3. Kirsi Lorentz and her research team (from left to right: Yuko Miyauchi, Grigoria Ioannou, Kirsi Lorentz and Iosif Hafez) at the XAFS/XRF beamline control hutch (© Kirsi Lorentz, The Cyprus Institute).

It is important to note that *LAAAMP* does not compete with regional AdLS initiatives. On the contrary, it helps to facilitate them, especially via its FAST Team training program and assistance in developing *Strategic Plans*. For example, Kirsi Lorentz and her graduate student, Grigoria Ioannou, from the Cyprus Institute were *LAAAMP* FAST Team awardees in 2017 and 2018 at the European Synchrotron Radiation Facility (ESRF), where Jean Susini and colleagues hosted them. Their team, shown in Fig. 3, became the first users at SESAME in Jordan, where they obtained palaeontology data on the XAFS/XRF beamline.

2ND AFRICAN LIGHT SOURCE CONFERENCE AND WORKSHOP (AFLS2)

Another important example of *LAAAMP*'s assistance to local efforts is the African Light Source initiative.



FIGURE 4. AFLS2 and PCCR2 Group Photo.

During 28 January-2 February, the AfLS Foundation convened its 2nd Conference and Workshop (AFLS2) at the University of Ghana-Legon, located just outside the capital city of Accra. AFLS2 convened jointly with the 2nd Pan-

African Conference on Crystallography (PCCr2). See the Group Photo in Fig. 4. There were approximately 250 attendees, with Francesco Sette, Director General of the ESRF, being among them. Kwabena Frimpong Boateng, Ghana's Minister of Environment, Science, Technology and Innovation, delivered a message from Ghana's President Nana Addo Dankwa Akufo-Addo, in which the President announced that he will champion the African Light Source to make it an official project of both the African Union and the Economic Community of West African States. According to President Akufo-Addo's statement, *A light source is a seed and magnet for high tech industry and all kinds of associated research institutions in all fields. It would be the most important, common, shared, very-large scale, scientific infrastructure for Africa.*

Three important recommendations from the Workshop are that African countries should form three kinds of consortia: the first consortium to become a collaborative member of an existing AdLS, the second to construct a collaborative multinational beamline at an existing AdLS, and the third to establish four regional research centres for research and training in crystallography and AdLSs in Northern, Eastern, Western and Southern Africa. Finally, a decision was made to collaborate with partners across Africa to develop local researchers' sample preparation and screening feeder facilities prior to taking those samples to AdLS for data acquisition. It was noted that the African Laser Centre (<https://www.africanlasercentre.net/>) is already an extensive network of laser laboratories across the African continent and could serve as the foundation for enhancing local feeder infrastructures.

MEXICAN LIGHT SOURCE

Another regional initiative to which *LAAAMP* is providing assistance is the Mexican Light Source. To realize that goal, on 25 November 2018, the Governor of the Mexican State of Hidalgo, Omar Fayad, announced plans to construct an AdLS in his state. He appointed Herman Winick of Stanford University, and originator of the idea for SESAME, President of the *Strategic and International Scientific Advisory Council* to lead the effort. Moreover, he named Lamán Carranza, Hidalgo's Secretary of Planning and Prospective, to lead the local effort within Mexico. The hope is that Mexico's President, Andres Manuel Lopez Obrador, will embrace the goal of bringing an AdLS to Mexico. To seed the effort, Governor Fayad allocated 25 million US dollars to begin planning. Matías Moreno of the Universidad Nacional Autónoma de México and Chair of *LAAAMP*'s Regional Committee for Mexico has worked diligently over the past decade to lay much of the foundation for this effort.

CARIBBEAN ACADEMY OF SCIENCES

The *LAAAMP* Executive Committee continues to reach out to the international community to spread the word of its activities. During 27-30 November 2018, author SKM traveled to the University of the West Indies-Mona Campus outside Kingston, Jamaica to attend the 21st General Meeting and Conference of the Caribbean Academy of Sciences (CAS) in celebration of the 30th Anniversary of CAS and 70th Anniversary of the University of the West Indies. There was tremendous interest in the *LAAAMP* FAST Team program, and thus *LAAAMP* was able to communicate its activities to more nations throughout the Caribbean. Fig. 5 depicts one of the authors (SKM) with the leaders of the CAS.



FIGURE 5. l-to-r: Robert Lancashire, CAS Foreign Secretary, Professor of Chemistry Emeritus, University of the West Indies, Mona Campus, Jamaica; Tara Dasgupta, CAS Jamaica Chapter President, Professor of Chemistry Emeritus, University of the West Indies, Mona Campus, Jamaica; Winston Mellows, CAS President, Professor Emeritus of Chemical Engineering, University of the West Indies, St. Augustine, Trinidad and Tobago; Sekazi Mtingwa, *LAAAMP* Chair of Executive Committee, TriSEED Consultants, USA.

UNESCO

In another outreach effort, on 29 January 2019, author SS attended the *Periodic Table and Sustainable Development Goals Session* at the *Opening Ceremony of the International Year of the Periodic Table 2019* at UNESCO's Headquarters in Paris. During his address shown in Fig. 6, he described *LAAAMP* as an example of international collaboration.



FIGURE 6. Sandro Scandolo at UNESCO's Opening Ceremony of the International Year of the Periodic Table 2019.

WORLD SCIENCE FORUM 2019

Two of the authors (MZ and SKM) attended the WSF 2019 in Budapest, Hungary during 20-23 November 2019 at the Hungarian Academy of Sciences. Michel Spiro, President of the International Union of Pure and Applied Physics, and MZ served as Co-Moderators of a Thematic Session entitled, *Basic Sciences Infrastructures for Ethical and Responsible Collaborative Development*. Among the speakers, Princess Sumaya bint El Hassan, President of the Royal Scientific Society of Jordan, gave opening remarks, and SKM summarized *LAAAMP*'s first three years, Strategic Plans and what future activities are under development. This session was one of the most highly attended Thematic Sessions at the WSF 2019, with well over a hundred persons in attendance.

The future is bright for *LAAAMP*. Stay tuned!

FÍSICA PARA A SAÚDE

A FÍSICA NA SAÚDE: CAMINHOS PROFISSIONAIS E TENDÊNCIAS

PHYSICS IN HEALTH: PROFESSIONAL PATHS AND TRENDS

Ana Maria Marques da Silva¹

RESUMO

Os físicos médicos que trabalham no ambiente clínico são profissionais de saúde, com educação e treinamento especializado nos conceitos e técnicas da física aplicados na medicina. Eles possuem um papel central na garantia do uso seguro e eficaz da radiação e estão envolvidos no projeto de instalações radiativas e na compra e implementação de novas tecnologias. O controle de qualidade e a segurança radiológica de pacientes, funcionários e indivíduos do público em geral são as suas principais responsabilidades. Apesar de a tecnologia de uso das radiações na medicina ter avançado substancialmente nas últimas décadas, devido à natureza altamente especializada da física médica e ao número relativamente pequeno de físicos médicos, o escopo de seu trabalho nem sempre é bem definido e nem bem entendido pelos profissionais e autoridades de saúde em todo o mundo. Este artigo tem como objetivo apresentar uma visão histórica do papel dos físicos que trabalham na área da saúde e medicina em suas diversas subespecialidades (radiologia diagnóstica, medicina nuclear, radioterapia e proteção radiológica), bem como as principais recomendações para seu treinamento. São apresentados os papéis desempenhados por físicos médicos em hospitais e clínicas no diagnóstico por imagem e na terapia. Finalmente, são abordadas as últimas tendências em física médica, apresentando algumas inovações tecnológicas e seus impactos nas atuações dos físicos.

Palavras chave: física médica, radioterapia, imagens médicas, proteção radiológica.

EXTENDED ABSTRACT

Throughout history, medical devices and procedures have benefited from the use of phenomena and experimental techniques of physics such as x-rays, particle accelerators, radioisotope labeling, radiation detection instrumentation, nuclear magnetic resonance, and ultrasound. These contributions have revolutionized the ways of visualizing the anatomical structure and function of the human body and the treatment of diseases. The relationship between medicine and physics has been mutual and essential for both disciplines for the overall goal of medicine: fostering human health.

Medical physics is a science that uses physics principles, methods, and techniques in practice and research for the prevention, diagnosis, and treat-

¹ Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul - PUCRS, ana.marques@puers.br

ment of human diseases with a specific goal of improving human health and well-being (IOMP, 2010a). This paper aims to present a historical overview of medical physicists' specialties and their roles, main recommendations for their training, as well as the latest trends in the field.

Historically, we can identify the most significant physics discoveries that significantly affected medicine at the end of the 19th century: Röntgen produced x-rays, Henri Becquerel discovered natural radioactivity, and Pierre and Marie Curie identified radium and isolated radioactive isotopes. None of them was a medical physicist in the modern sense, and the prospect of medical applications did not inspire their investigations. But when Röntgen circulated his wife's hand radiographs to his colleagues, the medical potential was immediately apparent. The harmful effects of radiation became patent very early on, and the Röntgen Society established, in 1898, a Committee on X-ray Injuries, initiating the discipline of radiation protection. The recognition of the biological effects of radioisotopes, reported by Becquerel in 1901, gave rise to another important area of clinical application: radiation therapy. Rapid technological developments in image quality and treatment standardization followed, with significant landmarks, including the development of a more reliable x-ray tube by William Coolidge and the standardization of radiation measurement by Rolf Sievert. The production of artificial radioisotopes had been achieved in 1934 by Irene Joliot-Curie and Frederick Joliot. The developments in nuclear physics technology after the second world war were crucial for the spread of artificial radioisotopes production in sufficient quantities for practical use in medicine (Mould, 1993; Keevil, 2012).

Medical physics emerged as a distinct scientific discipline early in the 20th century in response to the growing use of ionizing radiation in diagnosis and treatment (Keevil, 2012). Medical physicists working in the clinical environment are health professionals, with education and specialist training in the concepts and techniques of applying physics in medicine, competent to practice independently in one or more of the subfields of medical physics. The requirements for education and specialist training of medical physicists depend on the country. However, the International Organization of Medical Physics (IOMP) stated a minimum education requirement of a bachelor's degree in physics or equivalent degree and a master's degree level in medical physics or equivalent. The clinical training clinical should not be less than two years full-time equivalent, carried out under the direct supervision of a Certified Medical Physicist (CMP) (IOMP, 2010b).

Medical physicists have a central role in assuring the safe and effective use of radiation. They are involved in the design of facilities, purchase, and implementation of new technologies, quality control, and radiation safety for patients, staff, and the general public (IOMP, 2010a, 2010b).

Medical physics includes sub-specialties, such as radiation therapy, diagnostic radiology, nuclear medicine, and radiation protection. Radiation therapy physicists have been leading the development and application of particle accelerators in the treatment of cancer, where beams of electrons or highly energetic x-rays provide doses capable of destroying cancer cells and preventing the growth of tumors. In diagnostic radiology, medical physicists analyze the output of the imaging devices to ensure adherence to targeted expectations both in terms of high quality and low dose. They ensure that the actual output of the imaging technologies match their promises, capturing both its inherent capability and its optimum use. In nuclear medicine, radiopharmaceuticals are injected in patients, following their physiological process of interest. After the uptake, radiation passes through the body structures, being detected by an array of gamma detectors. Medical physicists in nuclear medicine departments assist with the physical aspects of any new applications for nuclear technologies, performing acceptance testing, maintaining a quality program of nuclear medicine instrumentation, and making any necessary dosimetric calculations (SNMMI, 2019). Medical physicists working with radiation protection are devoted to protecting people and their environment from potential radiation hazards while making it possible to enjoy the beneficial uses of radiation.

Thanks to the results of medical physics research, radiation technology has advanced substantially in the past decade. However, because of the highly specialized nature of medical physics and the relatively small numbers of medical physicists, the scope of their work is not always well defined, nor well understood, by health-care professionals and health authorities worldwide. The advances in the medical field, combining diagnosis and therapy to provide more personalized and adequate treatment to each patient, is requiring a higher number of medical physicists in hospitals and the industries to develop, optimize and validate new types of equipment and procedures (Samei & Grist, 2018). Medical physicists have an excellent potential to move beyond compliance and safety testing toward intentional evidence-based use of the technology to serve clinical care.

Key-words: medical physics, radiation therapy, medical imaging, radiation protection.

INTRODUÇÃO

A prática da medicina foi significativamente influenciada por aplicações indiretas e diretas das descobertas e invenções provenientes da física. Ao longo da história, dispositivos e procedimentos médicos se beneficiaram da aplicação de fenômenos e técnicas experimentais da física, como os raios X, os aceleradores de partículas, a produção de radioisótopos, a instrumentação

nuclear, a ressonância magnética e o ultrassom. Muitas dessas tecnologias possuem amplo uso no ambiente clínico, como no diagnóstico por imagem e na radioterapia. Essas contribuições revolucionaram as formas de visualizar a anatomia, a fisiologia e o tratamento de doenças. A relação entre a medicina e a física tem sido mútua e essencial para ambas as disciplinas, com um objetivo geral comum: promover a saúde humana.

Apesar da sofisticação e da especialização exigidas pela física moderna e pela medicina moderna, os dois campos mantêm uma forte interação. De fato, a medicina moderna deve muito à física moderna. A prática médica utiliza uma ampla gama de equipamentos que contêm dispositivos eletrônicos, fibras ópticas, detectores de radiação e instrumentação nuclear, por exemplo.

A física médica é uma ciência que utiliza princípios, métodos e técnicas de física na prática e na pesquisa para prevenção, diagnóstico e tratamento de doenças humanas com o objetivo específico de melhorar a saúde e o bem-estar humanos (IOMP, 2010a). Este artigo tem como objetivo apresentar uma visão histórica da física médica e dos papéis exercidos pelos físicos na saúde, as principais recomendações para sua formação e treinamento e as últimas tendências na área.

UMA PERSPECTIVA HISTÓRICA

Historicamente, podemos identificar as descobertas mais importantes da física que afetaram significativamente a medicina nos últimos quatro anos do século XIX: Röntgen produziu os raios X, Henri Becquerel descobriu a radioatividade natural e Pierre e Marie Curie identificaram o elemento rádio e isolaram isótopos radioativos. Nenhum deles era físico médico no sentido moderno e suas investigações não foram inspiradas pela perspectiva de suas aplicações médicas. No entanto, quando Röntgen apresentou as radiografias da mão de sua esposa para seus colegas, o potencial médico foi imediatamente reconhecido. Sabe-se que os efeitos nocivos da radiação tornaram-se evidentes desde o início e a Sociedade Röntgen estabeleceu, em 1898, um Comitê de Lesões por Raios X, iniciando a disciplina de proteção contra radiação ou proteção radiológica. O reconhecimento dos efeitos biológicos dos radioisótopos, relatados por Becquerel em 1901, deu origem a outra importante área de aplicação clínica: a radioterapia. Seguiram-se rápidos desenvolvimentos tecnológicos na melhoria da qualidade da imagem e na padronização de tratamentos, com marcos significativos que incluem o desenvolvimento de um tubo de raios X mais confiável por William Coolidge e a padronização da medição de radiação por Rolf Sievert. Embora a produção de radioisótopos tenha sido obtida em 1934 por Irene Curie e Frederick Joliot, o desenvolvimento da tecnologia nuclear após a Segunda Guerra Mundial foi crucial para

a produção em quantidades suficientes para uso prático na medicina (Mould, 1993; Keevil, 2012).

CAMINHOS PROFISSIONAIS NA FÍSICA MÉDICA

A física médica surgiu como uma disciplina científica distinta no início do século XX, em resposta ao crescente uso da radiação ionizante no diagnóstico e tratamento. O estabelecimento das primeiras posições para os físicos que trabalhavam em hospitais após a Primeira Guerra Mundial lançou as bases para uma nova profissão na área da saúde, que continua a desempenhar um papel essencial no desenvolvimento e na implementação segura e eficaz da tecnologia baseada na física (Keevil, 2012).

Os físicos médicos que trabalham no ambiente clínico são profissionais da saúde, com educação e treinamento especializado nos conceitos e nas técnicas de aplicação da física em medicina, competentes para praticar independentemente um ou mais subcampos da física médica. Os requisitos para educação e treinamento especializado de físicos médicos que trabalham como profissionais de saúde dependem muito do país. No entanto, a Organização Internacional de Física Médica (IOMP) estabeleceu como requisitos mínimos um diploma de bacharel em física ou um grau equivalente em uma disciplina de ciências físicas ou de engenharia e um nível de mestrado em física médica ou um grau equivalente em uma ciência física apropriada. O treinamento clínico não deve ser inferior a dois anos em período integral e deve ser realizado sob a supervisão direta de um Físico Médico Certificado no mesmo subcampo do treinamento (IOMP, 2010b).

O escopo das funções de um físico médico abrange uma ampla gama de atividades em hospitais nos quais a tecnologia da radiação é utilizada (IOMP, 2010a, 2010b). Como parte da equipe de profissionais de saúde, os físicos médicos têm um papel central na garantia do uso seguro e eficaz da radiação. Eles estão envolvidos nos projetos de instalações radiativas e na compra e implementação de novas tecnologias. O controle de qualidade e a segurança da radiação para pacientes, funcionários e indivíduos do público em geral são suas principais responsabilidades. Todas essas atividades dependem de uma compreensão aprofundada dos princípios de física das radiações e das tecnologias da radiação.

A física médica possui subespecialidades: a radioterapia, a radiologia diagnóstica, a medicina nuclear e a proteção radiológica.

Nos últimos cinquenta anos, os físicos de radioterapia têm liderado o desenvolvimento e a aplicação de aceleradores de partículas no tratamento do câncer. Inicialmente confinados a laboratórios de pesquisa, os aceleradores produzem feixes de elétrons ou raios X altamente energéticos e fornecem

doses capazes de destruir células cancerígenas e impedir o crescimento de tumores. Uma técnica avançada, chamada IMRT (radioterapia modulada por intensidade), vem expandindo a capacidade de controlar tumores, usando um software de planejamento que otimiza, com alta precisão, a forma do campo de tratamento. Isso é alcançado com colimadores que limitam o feixe de radiação do acelerador – fornecendo assim uma dose mais alta ao tumor – enquanto minimizam a radiação em tecidos saudáveis nas proximidades da região em tratamento.

Na radiologia diagnóstica, os físicos médicos analisam a saída dos dispositivos que produzem imagens para garantir sua aderência às expectativas, tanto em termos de alta qualidade quanto de baixa dose. Eles garantem que a saída real das tecnologias de imagem corresponda às suas promessas, capturando tanto sua capacidade inerente quanto seu uso ideal. Esse tipo de análise da qualidade e consistência de operação reduz a variabilidade no cenário clínico e permite a quantificação do impacto das novas tecnologias. Os físicos médicos são qualificados de maneira singular para realizar essa análise baseada em ciência de dados.

Na medicina nuclear, um traçador é injetado no corpo do paciente em pequenas quantidades para produzir imagens fisiológicas. Chamado radiofármaco, o traçador é um composto molecular (fármaco) associado a um material radioativo (radioisótopo). O radiofármaco é distribuído no organismo, seguindo o processo fisiológico ou sendo armazenado nas regiões de interesse. Após a captação, a radiação atravessa as estruturas do corpo, sendo detectada por uma série de sensores de radiação gama.

Os físicos médicos fazem parte da equipe de medicina nuclear, fornecendo assistência em relação a todos os aspectos físicos de novas aplicações para a tecnologia nuclear, realizando testes de aceitação e mantendo um programa de qualidade da instrumentação para medicina nuclear, além de realizar os cálculos dosimétricos (SNMMI, 2019).

Aqueles que trabalham com proteção contra radiação, também chamados de físicos em saúde, são dedicados a proteger as pessoas e seu ambiente contra possíveis riscos devido à radiação, ao mesmo tempo que viabilizam os usos benéficos da radiação.

TENDÊNCIAS NA FÍSICA MÉDICA

Embora a ciência da física médica e a prática clínica de diagnóstico por imagem e terapia tenham seguido trajetórias profissionais separadas, elas permanecem fortemente interconectadas.

Graças aos resultados da pesquisa em física, as tecnologias que envolvem a radiação avançaram substancialmente na última década. No entanto, devido à natureza altamente especializada da física médica e ao número relativamente pequeno de físicos médicos, o escopo de seu trabalho nem sempre é bem definido e nem bem entendido pelos profissionais e autoridades de saúde em todo o mundo.

Uma das tendências observadas na física médica é a busca pelo aumento da qualidade da imagem associada à otimização de custos, tempo e exposição à radiação. Além de imagens médicas de maior resolução espacial e especificidade, as técnicas de diagnóstico por imagem estão avançando no sentido de avaliar o comportamento de doenças em diferentes estágios, como a velocidade de oxigenação e perfusão de tumores em várias escalas, fornecendo indicadores sobre a resposta dos tecidos aos tratamentos quimioterápicos e radioterápicos. Para tanto, será preciso também investir no emprego da menor dose com a maior precisão – adquirida com maior velocidade e menor custo.

Uma área de futuro na física médica é a análise de imagens médicas nas quais se agrega a quantificação, possibilitando sua interpretação por meio de mapas paramétricos, que revelam as propriedades intrínsecas dos tecidos e suas propriedades biofísicas e fisiológicas. Nesse sentido, será preciso investir na criação e no desenvolvimento de biomarcadores quantitativos mais robustos e reprodutíveis, que permitam seu uso em várias modalidades de diagnóstico e tratamento, bem como sua adoção na prática clínica.

A pesquisa na área médica está avançando no sentido de combinar diagnóstico e terapia, em uma nova área denominada teranóstico, para oferecer um tratamento mais personalizado e adequado a cada paciente, levando à medicina personalizada. Nesse cenário, será essencial incorporar um número mais significativo de físicos médicos em hospitais e clínicas, bem como nas indústrias que desenvolvem equipamentos de diagnóstico e terapia.

A prática centrada no paciente, baseada em evidências e amparada por imagens médicas e radioterapia, pressupõe e requer o uso otimizado e consistente da tecnologia (Samei & Grist, 2018). Tecnologias inovadoras oferecem oportunidades aprimoradas para atendimento clínico de alta qualidade e para a medicina personalizada. No entanto, é necessário o máximo rigor no uso eficaz da tecnologia para obter alta qualidade, bem como a prática consistente da física médica. A física médica tem um excelente potencial para ir além dos testes de conformidade e segurança dos equipamentos, rumando em direção ao uso intencional e baseado em evidências da tecnologia para atender os cuidados clínicos.

AGRADECIMENTOS

A autora agradece o apoio recebido da Sociedade Brasileira de Física para participar do evento.

REFERÊNCIAS

IOMP. (2010a). Working Group on Policy Statement No. 1. IOMP policy statement no. 1: *The medical physicist: role and responsibilities*. Available at: https://www.iomp.org/wp-content/uploads/2019/02/iomp_policy_statement_no_1.pdf. Date: Jan 30, 2020.

IOMP. (2010b). IOMP Working Group on Policy Statement No. 2. IOMP policy statement no. 2: *Basic requirements for education and training of medical physicists*. Available at: https://www.iomp.org/wp-content/uploads/2019/02/iomp_policy_statement_no_21.pdf. Date: Jan 30, 2020.

Keevil, S. F. (2012). Physics and medicine: a historical perspective. *Lancet*, 379(9825), 1517-1524.

Mould, R. (1993). *A century of x-rays and radioactivity in medicine*. Bristol: IOP Publishing.

Samei E. & Grist T. M. (2018). Why Physics in Medicine? *J. Am. Coll. Radiol.* 15(7), 1008-1012.

SNMMI. (2019). Society of Nuclear Medicine and Molecular Imaging. Available at: <https://www.snmml.org/AboutSNMMI/Content.aspx?ItemNumber=4191>. Date: Jan 30, 2020.

PRINCÍPIOS E PRÁTICAS DE RADIOPROTEÇÃO E SUA APLICAÇÃO NA DOSIMETRIA PESSOAL

PRINCIPLES AND PRACTICE OF RADIOPROTECTION AND ITS APPLICATION IN PERSONAL DOSIMETRY

Maria da Conceição Abreu¹

Jorge Miguel Sampaio²

Patrick Emmanuel Sousa³

RESUMO

Apresenta-se uma introdução às propriedades das radiações ionizantes e suas origens. Introduzem-se as grandezas dosimétricas fundamentais e os princípios básicos da proteção radiológica. Descrevem-se os dosímetros individuais mais comuns e apresentam-se as regras de ouro para a sua boa utilização. Nas conclusões, discute-se a organização da proteção radiológica.

Palavras chave: Radiações ionizantes, Aplicações médicas, Radioproteção, Dosimetria.

EXTENDED ABSTRACT

The use of ionizing radiation in medicine, industry and scientific research is currently routine and generalized to many practices. The aim of this work is to provide a wide audience, with diverse backgrounds, summarized and systematized information on the international recommendations for radiation protection, as well as practical ways to protect and control exposure, in particular in individual dose monitoring.

Dosimetric quantities: To characterize the interaction of ionizing radiation with organs and tissues and to establish risk levels and limits to radiation exposure, three classes of dosimetric quantities are defined by the International Commission on Radiation Protection (ICRP): physical quantities, protection quantities and operational quantities. Physical quantities are those that directly measure the physical properties of radiation and their interaction with matter, like the linear energy transfer (LET) and the absorbed dose, *D*. Protection

¹ LIP - Laboratório de Instrumentação e Física Experimental de Partículas, Portugal, mabreu@lip.pt

² LIP - Laboratório de Instrumentação e Física Experimental de Partículas e Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa (FCUL), Portugal, jmsampaio@fc.ul.pt

³ Escola Superior de Saúde da Universidade do Algarve e GYRAD - Controle de Qualidade, Portugal, pesousa@gyrad.pt

quantities are those directly proportional to the risk of exposure (partial or total) to different types of radiation. They are calculated using reference phantoms (male and female) and serve to establish exposure limits in hypothetical individuals. The main protection quantities are the dose equivalent in organ or tissue T , H_T , and the effective dose, E . Operational quantities are those that are measured in practice by the instruments of radiological protection, the dosimeters. They are related to physical quantities through calibration factors and must produce a measure by excess of the protection quantities. The measured values of the operational quantities are used for the practical assessment of dose limits. In what concerns individual dosimetry, the relevant operational quantity is the personal equivalent dose at a depth d , $H_p(d)$, where $d=10$ mm for a measure of the effective dose, $d=0.07$ mm for a measure do the skin dose equivalent, H_{skin} , and $d=3$ mm for a measure of the eye lens dose equivalent.

Radiation protection principles and practice: There are three basic principles of radiological protection: justification, optimization, and dose limits. Justification states that any practice (planned exposure) that involves exposure to radiation should produce a net benefit for exposed individuals and society that compensates the harm that may be caused to their health and the environment. Optimization states that practices and devices should be adopted that keep individual doses and the number of people exposed (collective dose) to the lowest level reasonably possible. Dose limits states that maximum individual dose limits should be defined for workers and public. The legal dose limits currently applied in Portugal follow the European Directive 2013/59/Euratom and are presented in Table 1.

In practice there are only three parameters that we can adjust to optimize radiation protection: distance, time and barriers. So, there are three golden rules that we must follow and that do not require any special device:

- Rule 1: stay as far away from the source as possible, because the dose we receive decreases with the square of the distance between us and the source.
- Rule 2: place available screens between us and the source, glasses, lead aprons, wooden or metallic screens, as the radiation dose decreases exponentially with the thickness of the materials.
- Rule 3: be at the radiation site for the minimum possible time, because the radiation dose increases linearly with the exposure time.

It is important to note that these rules are not completely independent of each other and that it is often necessary to make a compromise between them. For example, if we use tweezers (increase the distance) to manipulate vials containing radioactive solutions, we have to be trained in this task, otherwise, we will not be fast enough (we increase the exposure time).

Dosimetric monitoring: It is necessary to maintain the dosimetric control of the exposed workers in order to monitor compliance with the limits set out in table 1. For this, we have to use calibrated detectors (dosimeters) to measure the relevant operational quantities, namely the personal equivalent dose, $H_p(d)$, for the whole body, eye lens and skin. According to the European Directive 2013/59/Euratom, category A workers have to be monitored at most monthly and a category B worker at most quarterly. Exposed apprentices and students are necessarily classified as category B. In addition to radiological monitoring, all exposed workers must have medical surveillance at the workplace.

There are in the market active dosimeters that allow immediate reading as well as passive dosimeters, in which reading is done by specialized companies. Due to the associated electronics, active dosimeters are generally larger and less practical to use on a daily basis. In addition, the maintenance and calibration cost of these dosimeters is generally higher than that of passive dosimeters. Therefore, in most medical activities, passive individual dosimeters are used, which require periodic collections to read and record doses for each worker.

The most common types of personal dosimeters are the film badge dosimeter, the thermoluminescent dosimeter (TLD), the optically stimulated luminescence (OSL) dosimeter, and the electronic personal dosimeter (EPD). The film badge dosimeters fell out of use and were replaced by TLD in most medical practices with radiation worldwide. TLDs have a high sensitivity and are made of tissue-equivalent materials, but have an important limitation: after heating, the accumulated information is lost, that is, they can only be read once. They have to be handled and stored carefully, as the information can be lost involuntarily through optical stimulation or heat. The dose reading is fully automated using dedicated equipment.

The great advantage of OSL over TLDs is that they can be re-read, since optical stimulation can be done in order to release only a part of the accumulated energy, however, they are sensitive to light and the tissue-equivalence is lower than that of TLDs. Until a few years ago, there was only one OSL dosimeter manufacturer, but currently others have emerged on the market, leading to a significant reduction in the costs of this type of dosimeter and a widespread in their use.

Rules for using individual dosimeters:

- Rule 1: Do not share the dosimeter, the dosimeter is for personal and non-transferable use. The dose received by the dosimeter is recorded in the name of the exposed worker on the dosimeter holder and filed in a permanent record.
- Rule 2: Do not deliberately expose the dosimeter to radiation. If the dosimeter has been inadvertently exposed to radiation, please con-

tact the person responsible for radiation protection for instructions. When not in use, the dosimeter should be kept away from sources of radiation. The dosimeter cannot be used for personal medical consultations or any non-occupational exposure procedure.

- Rule 3: Use the dosimeter properly. The whole-body dosimeter should be used in the most exposed region of the trunk, preferably at the level of the chest, a critical part of the body where most of the most radiosensitive organs (hematopoietic organs) are found. It should be worn over clothing and under the lead apron when it is worn. Pregnant women should use it at the level of the abdomen. In cases where the extremities and the head may be subject to significantly high doses, an extremity dosimeter (ring and wrist dosimeter) and/or an eye lens dosimeter must also be used. Another alternative to estimate the dose received in the unprotected parts of the body is the use of a second full-body dosimeter on the collar above the lead apron (see Fig. 8).
- Rule 4: Change dosimeter in time. The dosimeter cannot be read if it is not returned. The dosimeter must be changed based on the frequency (monthly or quarterly) associated with the category of the exposed worker (see Table 1). In case of loss or damage of the dosimeter, you must immediately contact the person responsible for radiological protection in the installation to proceed with its temporary exchange.
- Rule 5: Do not expose the dosimeter to heat. In all circumstances, the dosimeter must be kept in a safe place, at room temperature and protected from solar radiation.

Key-words: Ionizing radiation, Medical practices, Radioprotection, Dosimetry.

INTRODUÇÃO

O uso das radiações ionizantes na medicina, indústria e investigação científica é atualmente rotineiro e generalizado a muitas atividades. Em 100 anos após a descoberta dos raios-X por Wilhem Roentgen, em 1895, a radiologia de diagnóstico, a medicina nuclear e a radioterapia evoluíram para técnicas avançadas essenciais em todos os ramos e especialidades da medicina. As propriedades inerentes à radiação ionizante fornecem muitos benefícios, mas também podem causar danos potenciais. O seu uso na prática médica deve envolver um julgamento informado sobre os riscos para o paciente e para os profissionais de saúde expostos à radiação. Este julgamento requer

não apenas conhecimento médico, mas também um entendimento das propriedades da radiação. Este trabalho fornece uma introdução, que se pretende pedagógica, às propriedades da radiação, grandezas que caracterizam os seus efeitos e riscos e os princípios que norteiam a proteção radiológica. É desde já estabelecido que não se abordam novas teorias, experiências, modelos, etc. Tenta-se sim proporcionar a uma larga audiência, com formações diversas, informação resumida e sistematizada sobre as recomendações internacionais para a proteção radiológica, bem como modos práticos de proteção e controlo da exposição, em particular a monitorização individual de doses.

Para os leitores que pretenderem aprofundar alguns dos conceitos aqui expostos, recomendamos os livros de Turner (2007) e de Attix (1986), que são a principal referência nos estudos universitários da física das radiações na perspectiva da dosimetria e proteção radiológica. Sobre o tópico fontes e efeitos das radiações ionizantes, recomendamos o documento publicado pela United Nations Environment Programme (UNEP, 2016). Esta publicação, dirigida ao grande público, baseia-se nas conclusões do Comité Científico das Nações Unidas sobre os Efeitos da Radiação Atómica (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation – UNSCEAR). No que diz respeito às recomendações internacionais sobre as grandezas e os princípios de proteção radiológica, recomendamos a leitura dos primeiros capítulos da fonte original, o relatório (ICRP, 2007) da Comissão Internacional de Proteção Radiológica (International Commission on Radiological Protection – ICRP). A ICRP publica recomendações em proteção radiológica especializadas em diversas temáticas e que, recentemente, ficaram disponíveis gratuitamente (URL: <https://www.icrp.org>). Outra fonte importante de documentação especializada são as publicações da Agência Internacional de Energia Atómica (AIEA – URL: <https://www.iaea.org/publications>).

CARACTERIZAÇÃO DAS RADIAÇÕES IONIZANTES

Radiações ionizantes são todas as radiações eletromagnéticas ou partículas que, devido à sua energia, são capazes de ionizar os átomos e as moléculas. Para ionizar, por exemplo, os átomos de hidrogénio (H) e oxigénio (O) é necessária uma energia superior a 13,6 eV, correspondente à energia de ligação do eletrão orbital 1s do H (camada-K) ou 2p do O (camada-L₂₃). Os efeitos principais da radiação nos sistemas biológicos resultam da ionização das moléculas de água (H₂O) existentes nos tecidos e que levam à produção de radicais livres por meio do mecanismo de radiólise da água (chamados efeitos indiretos por oposição aos efeitos diretos de ionização da molécula de ADN). A energia necessária para ionizar uma molécula de H₂O é de 33 eV.

NOÇÕES BÁSICAS

Um átomo é constituído por um núcleo e eletrões arrumados em órbitas de energia diferentes. O núcleo, por sua vez, é constituído por prótons e neutrões organizados em diferentes níveis de energia. O número de prótons, isto é, o número atómico Z , caracteriza o elemento químico de acordo com a nomenclatura da Tabela Periódica. Núcleos com diferentes números de neutrões, mas do mesmo elemento, designam-se por isótopos. Em geral, um elemento químico pode ter isótopos estáveis e instáveis com diferentes abundâncias naturais.

Os isótopos instáveis transformam-se espontaneamente noutros elementos mais estáveis, liberando energia sob a forma de radiação. Estes elementos radioativos são designados por radionuclídeos. A radiação pode ser emitida sob a forma de fótons (radiação eletromagnética) ou de partículas.

Os fótons emitidos como resultado das transições entre níveis de núcleos atómicos designam-se por raios- γ . O processo de decaimento nuclear remove, muitas vezes, eletrões das orbitais atómicas interiores (camadas K e L), conduzindo a transições para orbitais de energia mais baixa. Estas transições são acompanhadas pela emissão de fótons designados por raios-X característicos (pois as suas energias permitem identificar o elemento químico de onde são emitidos) ou por eletrões de baixa energia, designados por radiação (ou eletrões) de Auger.

Para além da emissão- γ , os núcleos atómicos podem perder energia emitindo núcleos de hélio-4 (^4He), designados por partículas- α ou transformando um neutrão num próton com a emissão de um eletrão, designado por partícula- β^- , ou, ainda, transformando um próton num neutrão com a emissão de um pósitron, designado por partícula- β^+ . Quando uma partícula- β^+ encontra um eletrão, dá-se um processo de aniquilação com a emissão de dois fótons. É este processo de aniquilação (de pares eletrão-pósitron) que está na origem da tomografia por emissão de pósitrons (Positron Emission Tomography – PET).

Quando uma partícula carregada leve penetra num átomo, pode ser defletida pelo campo elétrico produzido pelo núcleo e eletrões atómicos. Esta variação de direção produz radiação eletromagnética, designada por radiação de travagem ou raios-X de travagem. Este é o efeito físico usado para a produção de raios-X em radiologia de diagnóstico e radioterapia.

Os raios-X usados em radiologia são produzidos em tubos de Coolidge, onde um feixe de eletrões, produzidos por aquecimento num filamento (cátodo), é orientado e acelerado por uma diferença de potencial (d.d.p.) para um alvo (ânodo) onde, ao incidir, produz um espectro contínuo de raios-X de travagem, ao qual se pode sobrepor um espectro discreto de raios-X característicos do elemento do alvo (normalmente as riscas K e/ou L desse elemento). Os alvos mais usados nos tubos de raios-X para equipamentos de radiologia

são o tungstênio (W), o molibdénio (Mo) e, no caso da mamografia, também o ródio (Rh).

A Fig. 1a) apresenta um esquema de um tubo de raios-X: o ânodo está orientado de forma a que os raios-X produzidos saiam pela janela do tubo perpendicularmente à direção do feixe de eletrões. A Fig. 1b) apresenta os espectros gerados por um tubo com um ânodo de W. Sem filtro são produzidos raios-X com energia muito baixa que não são úteis para a produção de imagens radiológicas, mas contribuem para a dose do paciente (são absorvidos no corpo paciente). Por isso, utilizam-se filtros de Al e outros materiais à saída da janela do tubo para remover a componente de baixa energia dos raios-X.

A energia máxima do espectro de raios-X é definida pelo produto da carga do eletrão vezes a d.d.p. Torna-se assim natural usar como unidade de energia múltiplos do eletrão-volt (eV) e caracterizar o espectro de radiação em termos da d.d.p. de operação do tubo. No exemplo da figura, a d.d.p. é de 100 kV e a energia máxima é, então, 100 keV.

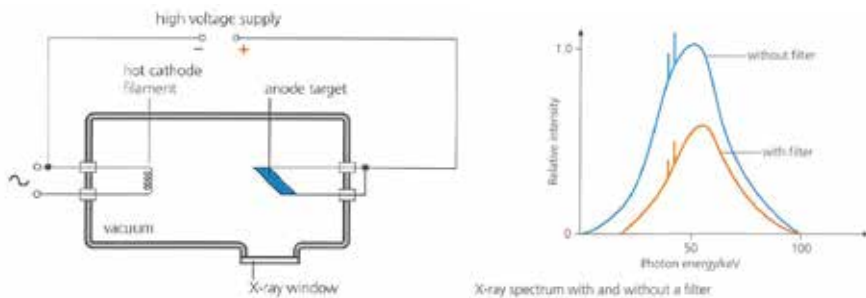


FIGURA 1. a) Esquema de um tubo de raios-X; b) espectros de raios-X (filtrado e não-filtrado) gerados por um tubo com um ânodo de W a 100 kV.

Em radiologia usam-se d.d.p. entre 20 e 120 kV, sendo que em mamografia o intervalo habitual situa-se entre os 20 e os 30 kV e na radiologia geral entre os 60 e os 120 kV. Em radioterapia usam raios-X produzidos com aceleradores lineares (linear particle accelerator – LINAC), onde os eletrões são acelerados através de campos elétricos oscilantes em radiofrequência dentro de cavidades ligadas em sequência (ver Fig. 2). Isto permite obter raios-X entre 1 e 25 MeV usados em radioterapia.

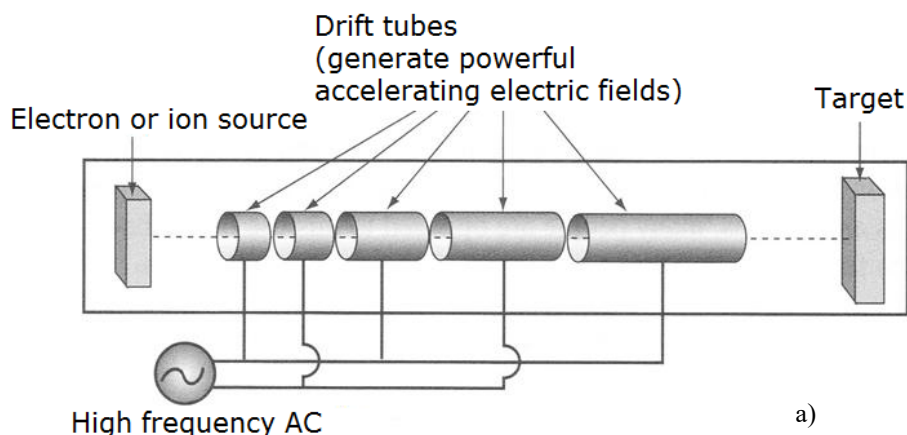


FIGURA 2. a) Esquema de aceleração num LINAC;
b) imagem de um LINAC para radioterapia.

Para acelerar eletrões ou partículas pesadas a energias mais elevadas são necessários aceleradores circulares. Existem empresas que produzem ciclotrões comerciais que aceleram prótons com energias entre os 18 e 70 MeV para produção de radionuclídeos usados em medicina nuclear. Nos últimos anos, algumas destas empresas começaram também a comercializar ciclotrões que aceleram prótons até 250 MeV para radioterapia.

FONTES DE RADIAÇÕES IONIZANTES

As fontes principais de radiações ionizantes a que estamos sujeitos ao longo da vida podem agrupar-se em duas famílias:

- Fontes naturais
 - Minérios radiativos que existem na crosta terrestre, como o potássio (K) e os elementos das cadeias do urânio (U), que podem afetar-nos por várias vias: inalação do gás de radão (Rn), ingestão de alimentos e bebidas ou, simplesmente, exposição externa;
 - Radiação de origem cósmica, que resulta essencialmente da interação de prótons de objetos exteriores ao sistema solar (supernovas, estrelas de neutrões, núcleos galácticos ativos, etc.) com a alta atmosfera, produzindo radiação secundária.
- Fontes artificiais
 - Aplicações médicas de fontes radioativas na medicina nuclear, utilização de aparelhos que produzem raios-X em radiologia de diagnóstico e aceleradores de partículas utilizados em radioterapia;
 - Aplicações industriais, como sejam as relacionadas com o ciclo do combustível nuclear (desde a mineração de urânio até a eliminação final ou acondicionamento de resíduos radioativos), radiografia industrial, irradiação industrial para esterilização de produtos médicos e farmacêuticos, preservação de produtos alimentares ou eliminação de infestações de insetos.

Atualmente estima-se que a média mundial das exposições devidas às fontes artificiais é cerca de 20%, sendo quase a totalidade destas devido às aplicações médicas (ver Fig. 3). No entanto, nos países mais desenvolvidos quase metade das exposições é de origem médica. A maior contribuição para a média mundial, com cerca de 40%, deve-se à exposição ao gás de radão-222 (^{222}Rn) com origem na cadeia natural de decaimento do urânio-238 (^{238}U). Contudo, esta percentagem tem uma grande variação entre áreas geográficas.



FIGURA3. Distribuição mundial de exposição à radiação. Retirado de UNEP, 2016.

Para além dos elementos radioativos naturais, radionuclídeos para aplicações médicas são produzidos em centrais nucleares e em ciclotrões. No âmbito do diagnóstico, os mais usados são o flúor-18 (^{18}F), que é o emissor- β^+ mais usado em PET, e o tecnécio-99 metaestável ($^{99\text{m}}\text{Tc}$), que é um emissor- γ muito usado em cintigrafia. Os isótopos do iodo (I) também têm várias aplicações médicas. O ^{125}I é, provavelmente, o mais usado em braquiterapia para o tratamento do cancro da próstata e o ^{131}I é um emissor- β^- usado no tratamento da tiroide; o ^{124}I também é usado em PET para imagiologia da tiroide.

Geralmente os radionuclídeos usados em medicina nuclear encontram-se no estado líquido, isto é, são fontes radioativas abertas, colocando riscos de contaminação externa e interna. Já os usados em braquiterapia apresentam-se na forma de sementes muito pequenas (alguns mm) que podem perder-se facilmente.

PODER DE PENETRAÇÃO DAS RADIAÇÕES

Para se perceber como nos devemos proteger das radiações ionizantes é fundamental conhecer as suas propriedades e, em especial, o modo como são absorvidas pela matéria em geral e pelos tecidos biológicos em particular.

As partículas- α , devido à sua elevada massa (dois prótons e dois neutrões) e carga (duas unidades de carga), são facilmente paradas na matéria, sendo o seu percurso muito pequeno. Em termos de proteção a uma fonte externa de partículas- α temos a vida facilitada, porque qualquer pequena espessura de material, ou mesmo o ar, pode servir de absorvedor para estas partículas. Mas, por outro lado, temos que evitar a entrada dos emissores de partícula- α no nosso organismo ou mesmo o seu contacto com a pele, uma vez que estas partículas depositam a energia de forma muito localizada, conduzindo facilmente à ulceração dos órgãos e tecidos expostos. É este o problema da inalação do gás de Rn em zonas geográficas suscetíveis a produzirem grandes concentrações no interior das habitações. O ^{222}Rn é um emissor- α gasoso que, uma vez nos pulmões, decai para o polónio-218 (^{218}Po) e seus descendentes sólidos, que são emissores- α e β^- . A exposição prolongada a estes agentes aumenta significativamente o risco de cancro do pulmão.

Os eletrões têm um comportamento mais dependente da sua energia, porque a sua massa é pequena e só têm uma unidade de carga. Em geral são absorvidos por filtros metálicos de alumínio (Al), mas obviamente o valor dessa espessura depende da energia dos eletrões. No entanto, mesmo que sejam absorvidos, dependendo da sua energia e do Z do material, podem produzir radiação-X de travagem. Isto não acontece com outras partículas carregadas, como os prótons e partículas- α , pois, devido à sua grande massa (a massa do próton é cerca de 1800 vezes a massa do eletrão), teriam de ser aceleradas a energias extremamente elevadas para produzirem radiação de travagem significativa.

A produção de radiação de travagem pelos eletrões ao atravessarem os absorvedores é importante na escolha e na combinação dos materiais para proteção contra as radiações (anteparos, contentores, cofres, etc.). Uma escolha de materiais ou uma configuração das barreiras pouco inteligente poderá produzir um aumento indesejado da radiação secundária.

A radiação eletromagnética não perde energia ao atravessar a matéria, pois os fótons não têm massa nem carga. No entanto, a probabilidade de interação (absorção ou dispersão) aumenta com a espessura do absorvedor. Consequentemente, o número de fótons que atravessam o absorvedor pode ser fortemente reduzido conforme o material e a espessura do absorvedor. Normalmente utilizam-se materiais com elevado Z e densidade como absorvedores, como o chumbo ou o tungsténio. Um composto que vem sendo utilizado para substituir o chumbo na proteção de instalações de radiologia e radioterapia é o sulfato de bário ou barita (BaSO_4).

A grandeza física que caracteriza o poder de penetração é o chamado poder de paragem, $S(E)$, definido como a energia perdida, dE , por uma partícula carregada por unidade de comprimento, dx , atravessada no absorvedor,

$$S(E) = -\frac{dE}{dx} \quad (1)$$

Esta grandeza tem unidades de energia por unidade comprimento e, em geral, exprime-se em $\text{keV}/\mu\text{m}$. No contexto dos efeitos da radiação nos órgão e tecidos, a parcela mais relevante do poder de paragem é a aquela onde as perdas devem-se a ionizações, isto é, o poder de paragem eletrónico. Chama-se a esta parcela transferência linear de energia (Linear Energy Transfer – LET), . Em bom rigor não se pode definir LET para partículas neutras, como fótons e neutrões. Para estas partículas deve-se utilizar o coeficiente de atenuação, , expresso geralmente em cm^{-1} , que quantifica o número médio de interações por centímetro de material atravessado. Por abuso de linguagem fala-se em LET dos neutrões, mas na realidade referimo-nos ao LET das partículas carregadas secundárias produzidas por estes.

GRANDEZAS DOSIMÉTRICAS

Para caracterizar a interação da radiação ionizante com os órgãos e tecidos e estabelecer níveis de risco e limites à exposição à radiação, definiram-se ao longo de várias décadas do século XX grandezas dosimétricas. Existem três classes de grandezas dosimétricas: grandezas físicas, grandezas de proteção e grandezas operacionais. Vamos de forma muito sumária definir as principais.

Grandezas físicas: São as grandezas que medem diretamente propriedades físicas da radiação e da sua interação com a matéria. Cabem neste grupo o LET e a dose absorvida, definida como,

$$D = \frac{dE_{abs}}{dm}, \quad (2)$$

onde dE_{abs} é a energia média absorvida num volume de massa dm quando atravessado pela radiação ionizante. A dose absorvida exprime-se em joule por quilograma (J/kg) ou gray (Gy).

Grandezas de proteção: São grandezas diretamente proporcionais ao risco da exposição (parcial ou total) a diferentes tipos de radiação. Calculam-se usando fantasmas de referência (masculino e feminino) e servem para estabelecer limites de exposição em indivíduos hipotéticos. Não servem para determinar riscos de exposição em pessoas concretas. Existem duas grandezas de proteção: a dose equivalente, H_T , de um órgão ou tecido, T , e a dose efetiva, E .

A dose equivalente é dada por

$$H_T = \sum_R w_R D_R, \quad (3)$$

onde D_R é a dose absorvida para a radiação do tipo R (fótons, eletrões, prótons, partículas- α , etc.) e w_R é um fator de escala que tem em conta o efeito biológico das diferentes radiações. Este fator é normalizado ao efeito da radiação- γ e X, isto é, $w_R = 1$ para fótons. Para eletrões temos $w_R = 1$, para prótons $w_R = 2$, para partículas- α $w_R = 20$ e para neutrões é uma função dependente da energia (ICRP, 2007). Isto significa que o risco devido à exposição a partículas- α é 20 vezes superior ao risco de exposição a raios- γ para a mesma dose absorvida.

A dose efetiva é dada por

$$E = \frac{w_T}{2} (H_T^M + H_T^F), \quad (4)$$

isto é, define-se como a média dos equivalentes de dose calculados com um fantoma masculino e outro feminino. O fator de ponderação, w_T , tem em conta a contribuição de cada órgão ou tecido para o detrimento geral, uma vez que os nossos órgãos e tecidos têm resistência diferenciada à radiação. Por exemplo, atualmente considera-se que o pulmão, a mama, a tiroide, o cólon, o estômago e a medula óssea, quando expostos, contribuem com 12% para o detrimento de um indivíduo, e o cérebro, a pele e as glândulas salivares, apenas 1%. Note-se que a soma sobre todos os órgãos deve estar normalizada, $\sum_T w_T = 1$. No relatório ICRP (2007) podem-se encontrar os valores de w_T atualmente recomendados para os restantes órgãos.

Grandezas operacionais: São as grandezas que são medidas, na prática, pelos instrumentos de proteção radiológica, isto é, os dosímetros. Relacionam-se com as grandezas físicas por meio de fatores de calibração e devem produzir uma medida, por excesso, das grandezas de proteção. Os valores medidos das grandezas operacionais são usados para a avaliação prática dos limites de dose. A grandeza de base para definição das grandezas operacionais é o equivalente de dose, $H = Q \times D$, onde D é a dose absorvida medida no volume sensível do detetor e $Q \equiv Q(L)$ é o fator de qualidade que pesa o risco da radiação. O fator de qualidade distingue-se dos fatores w_R na medida em que o primeiro é definido apenas em termos do LET e o segundo apenas em termos do tipo de partícula incidente (apenas no caso dos neutrões os w_R dependem da energia).

Tanto os coeficientes de ponderação da radiação, w_R , como o fator de qualidade, Q , são adimensionais, pelo que a dose equivalente e o equivalente de dose têm as mesmas dimensões da dose absorvida, isto é, J/kg. No entanto, para distinguir que os efeitos biológicos da radiação foram tidos em conta, utiliza-se o sievert (Sv) como unidade das grandezas de proteção e operacionais. Desta forma, podemos comparar diretamente os riscos associados aos diferentes tipos de radiação ou diferentes LET.

As grandezas operacionais para monitorização de área são o equivalente de dose ambiente (Ambiente Dose Equivalent – ADE) à profundidade d , $H^*(d)$ e o equivalente de dose ambiente direcional à profundidade d , na direção Ω : $H'(d, \Omega)$. Mais importantes para a presente discussão são as grandezas operacionais para monitorização individual. Neste caso, define-se o equivalente de dose pessoal à profundidade d , $H_p(d)$, onde $d=10$ mm para a monitorização da dose efetiva (corpo inteiro), E ; $d=0.07$ mm para a monitorização da dose equivalente nas extremidades (dedos e pele), $H_{dedos,pele}$; e $d=3$ mm para monitorização da dose equivalente no cristalino, $H_{cristalino}$. São estas as grandezas medidas pelos dosímetros pessoais que discutiremos mais adiante.

PRINCÍPIOS DA PROTEÇÃO RADIOLÓGICA

Para percebermos os objetivos e princípios da proteção radiológica, é preciso distinguir dois tipos de efeitos biológicos da radiação em função da dose equivalente nos órgãos e tecidos.

Efeitos deterministas: São caracterizados por produzirem um efeito cuja gravidade aumenta com a dose assim que esta ultrapasse um determinado limiar. Surgem, normalmente, algumas horas, dias ou semanas após a irradiação (tempo de latência curto), mas em alguns casos podem aparecer muito tempo depois (por exemplo, deficiência hematopoiética, indução de cataratas ou fibrose pulmonar). Os efeitos deterministas resultam da morte celular, o que normalmente ocorre apenas a doses elevadas ($H > 1$ Sv).

Efeitos estocásticos: São caracterizados por um aumento da probabilidade de ocorrência do efeito com a dose, mas não da sua gravidade. Assume-se que para estes efeitos não há limiar inferior de dose, isto é, qualquer valor de dose aumenta a probabilidade de ocorrência de um efeito. Manifestam-se, normalmente, muitos anos após a irradiação (por exemplo, indução do cancro). Os efeitos estocásticos resultam de mutações genéticas devido à exposição a baixas doses ($H < 1$ Sv).

Assim, podemos enunciar os objetivos da proteção radiológica como sendo:

- Prevenir os efeitos patológicos deterministas da radiação;
- Limitar a níveis aceitáveis os efeitos de natureza estocástica.

O primeiro objetivo indica que em nenhuma situação um indivíduo deve ser exposto a uma dose de radiação que provoque efeitos deterministas. Se isso acontecer, então estamos perante um acidente radiológico. A única exceção é nas exposições dos pacientes em práticas médicas, nomeadamente em radioterapia, uma vez que o objetivo é matar as células tumorais. No entanto, o efeito determinista deve ser conformado, tanto quanto possível, ao tumor, poupando os tecidos sãos. O segundo objetivo indica que nunca é possível eliminar totalmente o risco da radiação, pois não existem situações onde a dose é nula. No entanto, devemos limitar essa exposição tendo em conta a relação custo-benefício.

Assim, enunciam-se três princípios básicos da proteção radiológica:

- Justificação: Qualquer prática (exposição planeada) que envolva a exposição à radiação deve produzir um benefício aos indivíduos expostos e à sociedade de modo a compensar os malefícios eventualmente causados à saúde e ao ambiente pelas radiações;
- Otimização: Devem ser adotadas práticas e dispositivos que mantenham as doses individuais e o número de pessoas expostas (dose coletiva) ao nível mais baixo razoavelmente possível;
- Limites de dose: Deverão ser definidos limites máximos de dose individuais para trabalhadores expostos à radiação e para o público.

Os princípios da Justificação e da Otimização aplicam-se a todas as situações planeadas (em medicina, indústria e investigação), de emergência (socorro a vítimas e mitigação dos efeitos de acidentes radiológicos e nucleares) e existentes (por exemplo, exposição à radiação natural e de minas radioativas, exposição ao radão e exposição das tripulações de voo aos raios cósmicos). O princípio da limitação de doses aplica-se também a todas as situações, exceto à exposição dos pacientes em práticas médicas.

O princípio da Justificação implica uma análise de custo-benefício para o indivíduo que sofre a exposição e para a sociedade. Nomeadamente deve-se ponderar se existem práticas alternativas que produzam o mesmo resultado sem ou com menor exposição. Por exemplo, um médico que prescreve uma

tomografia axial computadorizada (TAC) deverá ponderar se não existe um meio de diagnóstico equivalente que não envolva radiações ionizantes, como a ressonância magnética.

O princípio da Otimização afirma que as doses individuais e coletivas devem ser reduzidas ao valor mínimo razoável em termos de custos. Isto é, deve-se ser mais ambicioso do que os limites de dose impostos legalmente, mas não tão ambicioso que torne o projeto financeiramente inviável. Este princípio é conhecido pelo acrónimo ALARA (As Low as Reasonable Achievable).

LIMITES INDIVIDUAIS DE DOSE

No caso das situações planeadas, as autoridades competentes devem estabelecer limites legais de dose, exceto no caso dos pacientes sujeitos a exposições em práticas médicas (note-se que esta exceção não se aplica ao pessoal médico, enfermeiros e cuidadores desses pacientes). No caso das situações existentes e de emergência devem estabelecer-se, para cada atividade específica, níveis de referência que podem ser transitoriamente superiores aos limites legais de dose. É o caso dos níveis de concentração de radão adotados em vários países.

Os limites individuais de dose atualmente em vigor em Portugal estão publicados no Decreto-Lei n.º 108/2018, de 3 de dezembro, que transpõe a Diretiva Europeia 2013/59/Euratom. Estes limites referem-se ao público e aos trabalhadores expostos, isto é, profissionais cuja natureza do trabalho possa incluir exposição adicional às radiações ionizantes. São exemplos os trabalhadores de centrais nucleares, profissionais de radiologia, radioterapia e medicina nuclear, profissionais de radiografia industrial e, também, tripulações de voo. Esses limites são apresentados na Tabela 1.

TABELA 1. Limites legais de dose para o público e trabalhadores de acordo com o Dec.-Lei n.º 108/2018 e Diretiva Europeia 2013/59/Euratom.

	Dose efetiva E	Dose equiv. 1 cm ² de pele H_{pele}	Dose equiv. no cristalino $H_{cristalino}$	Dose equiv. nas extremidades H_{dedos}
População geral	1 mSv/ano	50 mSv/ano	15 mSv/ano	
Trabalhadores da categoria A	20 mSv/ano ¹	500 mSv/ano	20 mSv/ano ²	500 mSv/ano
Trabalhadores da categoria B	6 mSv/ano	150 mSv/ano	15 mSv/ano	150 mSv/ano
Trabalhadoras grávidas e lactantes	1 mSv/ano ³			

¹Pode ser até 50 mSv/ano desde que não exceda uma média de 20 mSv/ano em 5 anos.

²Pode ser até 100 mSv em 5 anos desde que não exceda um máximo de 50 mSv num ano.

³É o limite para o feto.

Note-se que os valores dos limites para o cristalino para trabalhadores expostos reduziram-se de forma significativa com a nova diretiva. A categoria dos trabalhadores depende das exposições potenciais e tem implicações na frequência do controlo dosimétrico. Assim, um trabalhador da categoria A tem de ser monitorizado, no máximo, mensalmente, e um trabalhador da categoria B, no máximo, trimestralmente. Os aprendizes e estudantes expostos são necessariamente classificados como sendo da categoria B. Além da monitorização radiológica, todos os trabalhadores expostos devem ter vigilância médica do trabalho regular.

REGRAS PRÁTICAS DE PROTEÇÃO

Existem apenas três parâmetros que podemos ajustar para otimizar a proteção radiológica: distância, tempo e barreiras. Assim, existem três regras de ouro que devemos seguir e que não exigem nenhum aparelho:

- Regra 1: Afastarmo-nos, tanto quanto possível, da fonte, porque a dose que recebemos decresce com o quadrado da distância que houver entre nós e a fonte;
- Regra 2: Colocar barreiras disponíveis entre nós e a fonte, tais como óculos, aventais de chumbo, anteparos de madeira ou metálicos, pois a dose de radiação decresce exponencialmente com a espessura dos materiais;
- Regra 3: Estar no local com radiações o mínimo tempo possível, porque a dose de radiação cresce linearmente com o tempo de exposição.

É importante salientar que estas regras não são totalmente independentes entre si e, algumas vezes, é necessário fazer um compromisso entre elas. Por exemplo, se recorrermos a pinças (aumentar a distância) para manipular frascos contendo soluções radioativas, temos que estar treinados nessa tarefa, caso contrário, não seremos suficientemente rápidos (aumentamos o tempo de exposição).

CONTROLO DOSIMÉTRICO

Como vimos, é necessário manter um controlo dosimétrico dos trabalhadores expostos de forma a monitorizar o cumprimento dos limites constantes da Tabela 1. Para isso, temos de utilizar detetores (dosímetros) calibrados para medir as grandezas operacionais equivalentes de dose pessoal, onde $H_p(10)$ é uma medida de E , $H_p(0.07)$ é uma medida de H_{pele} e $H_p(3)$ é uma medida de H_{dedos} , $H_{cristalino}$.

Existem no mercado dosímetros ativos, de leitura imediata, e passivos, em que a leitura é feita por empresas especializadas. Devido à eletrônica associada, os dosímetros ativos são geralmente maiores e menos práticos de serem utilizados no dia a dia. Além disso, o custo de manutenção e calibração destes dosímetros é, geralmente, maior do que os dos dosímetros passivos. Por isso, na maioria das atividades médicas utilizam-se dosímetros individuais passivos, que exigem recolhas periódicas para a sua leitura e registo das doses no nome do trabalhador exposto.

Dosímetros filme: Os filmes fotográficos contêm uma emulsão à base de uma gelatina de brometo de prata (AgBr), que é sensível à radiação. Uma vez revelados, as zonas expostas surgem escurecidas, sendo possível estabelecer uma relação entre a densidade ótica do filme revelado e a dose. Estes dosímetros podem conter vários filmes com diferentes sensibilidades à radiação ou, mais comum, um único filme com várias emulsões de sensibilidades diferentes. A combinação de emulsões com concentrações diferentes de AgBr permite estender o intervalo de sensibilidade destes dosímetros a várias ordens de magnitude.

O filme é montado num suporte que contém vários filtros (ver Fig. 4) que atenuam a radiação, de modo a diferenciar tipos de radiação e energias. Na ausência de filtros, todas as partículas são detetadas, nomeadamente, radiação-X e gama, partículas- β e α que atingem o portador. A colocação de uma janela de plástico com diferentes espessuras permite absorver as partículas- α ; para absorver partículas- β e raios-X abaixo dos 65 keV utiliza-se janelas de Al ou de dural (liga de alumínio, cobre, manganês e magnésio). Para filtrar fótons até 2 MeV usam-se filtros de estanho (Sn) e chumbo (Pb). Uma vez que a secção eficaz de captura de neutrões no cádmio (Cd) é muito elevada, utilizam-se filtros deste elemento quando pretendemos detetar neutrões. A colocação de diferentes filtros no mesmo dosímetro permite, assim, diferenciar o tipo e as energias da radiação.

Os dosímetros filme são baratos e podem ser lidos várias vezes, mas isso depende da qualidade do revelador, do tempo e das condições de armazenamento, uma vez que são sensíveis à humidade e à temperatura. Outra limitação importante é que a densidade ótica não cresce linearmente com a dose e as curvas de calibração dependem do lote de fabrico.

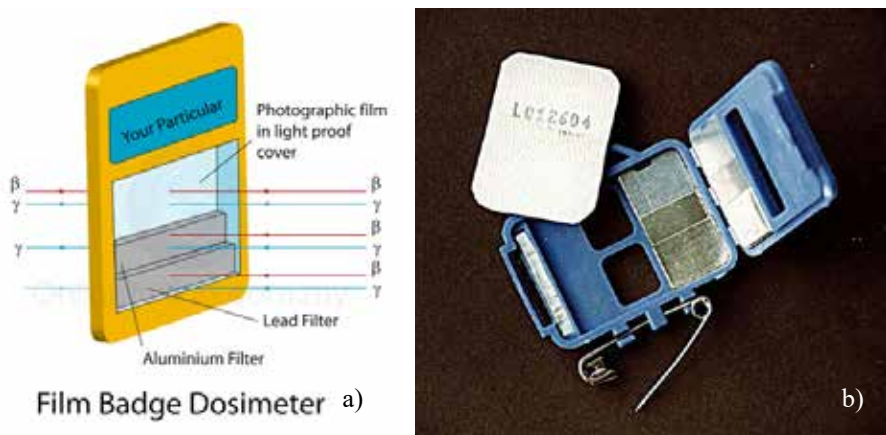


FIGURA 4. Dosímetro filme: a) Esquema do suporte mostrando o efeito dos vários filtros; b) Imagem de um suporte aberto, mostrando os filtros e o filme.

Dosímetros TLD: São feitos de um cristal termoluminescente (TL) colocado numa embalagem radiolúcida (ver Fig. 5). Quando o material TL é exposto à radiação, absorve parte da energia na sua estrutura cristalina (formam-se pares eletrão-lacuna que ficam aprisionados em estado metaestáveis criados por impurezas adicionadas ao cristal). Quando aquecido, o cristal liberta a energia acumulada na forma de radiação azul ou ultravioleta, que pode ser lida utilizando-se um fotomultiplicador. O máximo da emissão situa-se nos 200°C e a intensidade é proporcional à dose.

Geralmente utilizam-se cristais de fluoreto de lítio (LiF), em duas formas: o TLD-600 e o TLD-700. O primeiro é enriquecido em ^6Li para aumentar a sensibilidade aos neutrões, uma vez que a reação $n+^6\text{Li} \rightarrow \alpha + ^3\text{H}$ tem uma secção eficaz elevada, permitindo a deteção indireta dos neutrões. A sensibilidade dos TLD-600 às diferentes energias dos neutrões depende muito do grau de enriquecimento. O TLD-700 é empobrecido em ^6Li (isto é, contém quase exclusivamente ^7Li), sendo apenas sensível às restantes radiações.

Os TLD têm uma elevada sensibilidade e são construídos em materiais equivalentes de tecido, mas têm uma limitação importante: após o aquecimento, a informação acumulada perde-se, isto é, só podem ser lidos uma vez. Podem, no entanto, ser recozidos para serem reutilizados. Têm de ser manuseados e acondicionados com cuidado, pois a informação pode se perder involuntariamente com estimulação ótica ou calor. A leitura da dose é totalmente automatizada, com o uso de equipamentos dedicados.

Estes dosímetros são apresentados em forma de crachás usados no torso para medidas do $H_p(10)$ e $H_p(0.07)$ ou na forma de anel para medidas do $H_p(3)$.

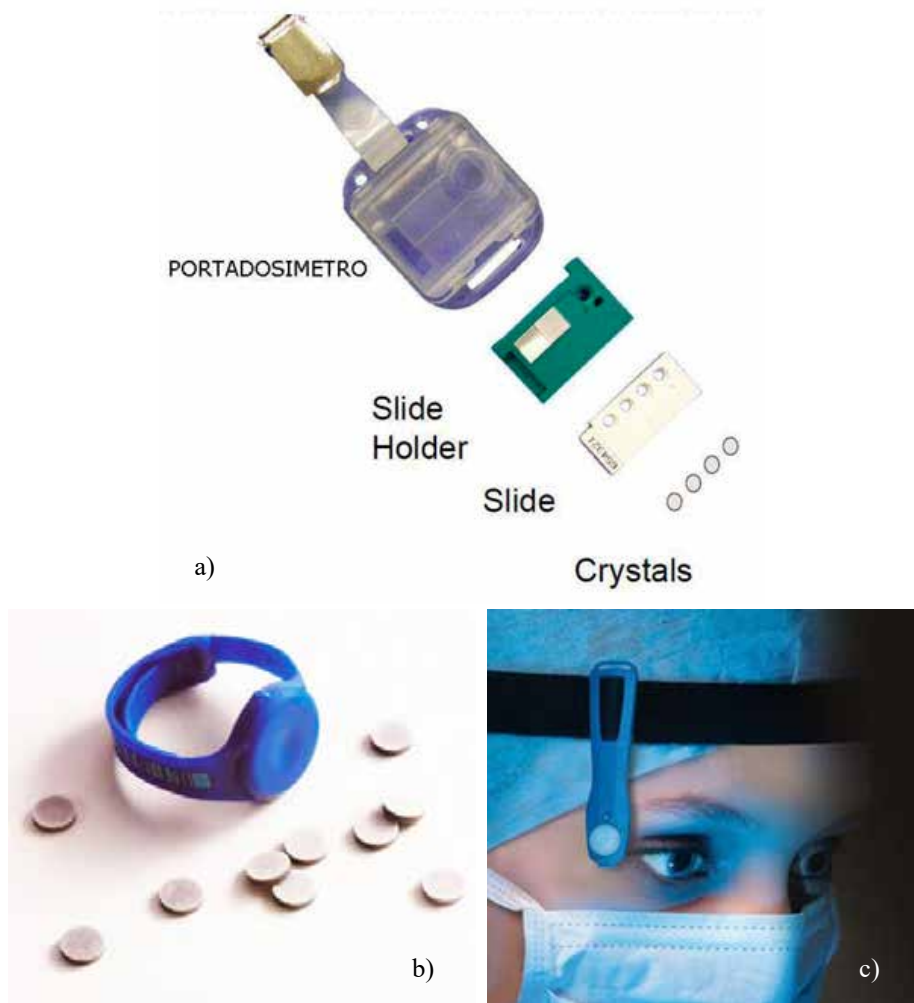


FIGURA 5. Dosímetros TLD: a) Componentes do dosímetro de corpo inteiro; b) suporte para dosímetro de dedo e cristais TL; c) aplicação de um TLD para monitorização do cristalino.

Dosímetros OSL: Estes dosímetros funcionam de forma muito semelhante aos TLD, mas o processo de luminescência é induzido por estimulação ótica, em vez da temperatura. Designam-se, por isso, dosímetros luminescentes opticamente estimulados (Optically Stimulated Luminescence – OSL). Geralmente utilizam-se cristais de óxido de alumínio (AlO_3) e óxido de berílio (BeO_3) dopados com impurezas.

A grande vantagem dos OSL sobre os TLD é que podem ser reutilizados, uma vez que a estimulação ótica pode ser feita de modo a libertar apenas uma parte da energia acumulada e não requerem recozimento para serem reutili-



FIGURA 7. Dosímetro eletrónico (EPD: a) mostrador para leitura em tempo real; b) aplicação de um EPD para leitura da dose de corpo inteiro.

REGRAS DE UTILIZAÇÃO DOS DOSÍMETROS INDIVIDUAIS

Não partilhar o dosímetro: O dosímetro é de uso pessoal e intransmissível. A dose recebida pelo dosímetro é registada no nome do trabalhador exposto que consta no porta-dosímetro e arquivada num registo permanente.

Não expor o dosímetro deliberadamente à radiação: Se o dosímetro foi exposto inadvertidamente à radiação, por favor contacte o responsável pela proteção radiológica para receber instruções. Sempre que não estiver a ser usado, o dosímetro deve ser mantido afastado de fontes de radiação. O dosímetro não pode ser usado nas consultas médicas de carácter pessoal ou em qualquer procedimento de exposição não ocupacional.

Usar o dosímetro adequadamente: O dosímetro de corpo inteiro deve ser usado na região mais exposta do tronco, preferencialmente ao nível do tórax, local crítico do corpo onde se encontra a maioria dos órgãos mais radiosensíveis (órgãos hematopoiéticos). Deve ser usado por cima da roupa e por debaixo do avental de chumbo, quando este é usado. As mulheres grávidas devem usá-lo ao nível do abdómen. Nos casos em que as extremidades e a cabeça possam estar sujeitas a doses significativamente altas, deve-se usar adicionalmente um dosímetro de extremidade (dosímetro de anel e de punho) e/ou um dosímetro de cristalino. Uma outra alternativa para estimar a dose recebida nas partes do corpo não protegidas é a utilização de um segundo dosímetro de corpo inteiro no colar por cima do avental de chumbo (ver. Fig. 8).

Trocar de dosímetro atempadamente: O dosímetro não pode ser lido se não for devolvido. Deve proceder à troca do dosímetro com base na periodicidade (mensal ou trimestral) associada à categoria do trabalhador exposto. Em caso de perda ou dano do dosímetro, deverá contactar imediatamente a pessoa responsável pela proteção radiológica na instalação para se proceder à troca temporária do mesmo.

Não expor o dosímetro ao calor: Em todas as circunstâncias, o dosímetro deve ser mantido em local seguro, à temperatura ambiente e protegido da radiação solar. Embora o OSL não seja sensível às variações de temperatura, o TLD já é, pelo que a exposição excessiva ao calor pode apagar a dose registada.

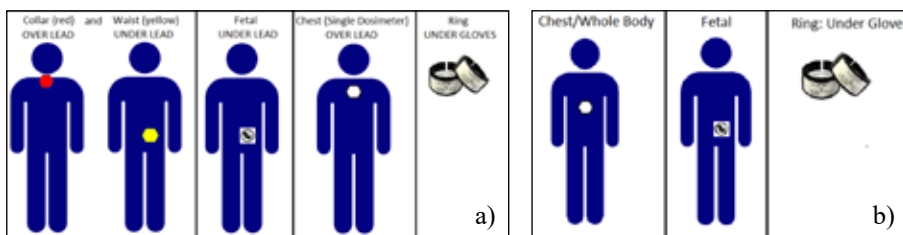


FIGURA 8. Regras para utilização do dosímetro pessoal: a) com avental de chumbo; b) sem avental de chumbo.

DOSÍMETROS DE MONITORIZAÇÃO DE ÁREA E CONTROLO DE QUALIDADE

A monitorização dosimétrica não se esgota na dosimetria individual. Em determinadas instalações é necessária a colocação de monitores de área que medem os valores de ADE para um indivíduo de referência. São sistemas ativos fixos que permitem controlar em tempo real as grandezas operacionais H^* e H' de dose em locais de maior risco. Para além dos sistemas fixos, existe no mercado uma grande variedade de detetores portáteis que servem para a monitorização de eventuais fontes radioativas perdidas (por exemplo, sementes usadas em braquiterapia) ou contaminação de superfícies (por exemplo, em laboratórios que manipulam fontes radioativas líquidas ou em pó).

Devemos ainda referir que existem dosímetros específicos para fazer o controlo de qualidade dos equipamentos de radiologia e radioterapia. Estes são geralmente câmaras de ionização construídas de forma a serem equivalentes de tecido e desenhadas de acordo com o tipo de equipamento e de grandeza dosimétrica a controlar. Em radiologia e radioterapia também são utilizados filmes radiocrómicos que contêm um corante que muda de cor quando exposto à radiação ionizante. Ao contrário dos filmes convencionais, os filmes radiocrómicos não necessitam da revelação.

Os protocolos de controlo dosimétrico dos equipamentos de radiologia e radioterapia obedecem a regras internacionais bem estabelecidas. Os dosímetros e monitores de radiação ativos têm de ser calibrados em laboratórios de metrologia das radiações (laboratórios primários e secundários) com intervalos de alguns anos. Em Portugal essa competência cabe ao Instituto Português da Qualidade (I.P.Q.) e a periodicidade é bianual (Portaria n.º 1.106/2009, de 24 de setembro).

CONCLUSÕES

Desde a descoberta dos raios-X, a utilização das radiações ionizantes nas mais diversas atividades trouxe enormes benefícios para a medicina, a indústria e a investigação. Simultaneamente foi-se constituindo um corpo de conhecimento na física das radiações e dos seus efeitos biológicos que permitiu construir um sistema coerente de conceitos, grandezas e boas práticas de proteção radiológica. Este sistema é mantido e atualizado por organizações internacionais com elevada capacidade técnica e científica, como são o UNSCEAR, o ICRP e a AIEA, entre outras.

Com a generalização da utilização das radiações em diversas áreas médicas, tornou-se essencial que os responsáveis políticos, profissionais expostos, os pacientes e o público tenham maior consciência dos riscos associados a estas práticas. Em primeiro lugar, é preciso que os estados adotem na forma de legislação e recomendações nacionais e/ou regionais as normas internacionais. Em seguida, é necessário que existam autoridades competentes científica e tecnicamente, com independência financeira e política, que façam cumprir e fiscalizem o cumprimento dessa legislação. Isto significa que têm de ter os recursos humanos suficientes e com a formação adequada e não podem estar dependentes de organizações públicas ou privadas que sejam parte interessada na utilização de radiações ionizantes. Estas autoridades terão responsabilidades na autorização de fontes radioativas e equipamentos produtores de radiações, licenciamento e fiscalização das instalações e do cumprimento das normas de proteção radiológica, bem como eventuais sanções por incumprimento.

Ao nível das instalações é necessário que exista uma pessoa Responsável pela Proteção Radiológica (RPR) com formação avançada e reconhecimento profissional. No contexto hospitalar e clínico, esta pessoa pode e deve ser o Físico Médico devidamente certificado. O RPR deverá elaborar, para cada instalação que utilize radiações ionizantes, um Plano de Proteção Radiológica contendo uma descrição dos procedimentos adequados à prática a realizar, dos equipamentos de proteção e sistemas de monitorização da radiação disponíveis. Este plano também deverá identificar quais as situações po-

tenciais de emergência e os procedimentos a realizar nesse caso (por exemplo, derrames de material radioativo, perdas de sementes, sobreexposição de um trabalhador, etc.). O RPR é ainda responsável pela formação dos trabalhadores expostos, estando obrigado a promover uma Cultura de Segurança na instalação. É responsável ainda pelo registo das fontes radioativas, pelo controlo de qualidade dos equipamentos que produzam radiações ionizantes e pela verificação do bom funcionamento dos aparelhos de monitorização da radiação, nomeadamente dos dosímetros pessoais dos trabalhadores expostos.

AGRADECIMENTOS

A autora Maria da Conceição Abreu agradece o apoio recebido da Sociedade Portuguesa de Física para participar do evento.

REFERÊNCIAS

Attix, F. H. (1986). *Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry*. WILEY-VCH GmbH & Co. KGaA.

ICRP. (2007). *The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection* (ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37). International Commission on Radiological Protection. <http://www.icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%20103>

Market Intellica. (2019). *Global Dosimetry Market Study 2016-2026 by segment*. Market Intellica. <https://www.marketintellica.com/report/MI22049-global-intelligent-dosimetry-equipment-market-study>

Turner, J. E. (2007). *Atoms, Radiation and Radiation Protection* (3rd Edition). WILEY-VCH GmbH & Co. KGaA.

UNEP (2016). *Radiação, Efeitos e Fontes*. United Nations Environment Programme. <http://hdl.handle.net/20.500.11822/7790>

APLICAÇÕES DE FÍSICA MÉDICA NUMA UNIDADE HOSPITALAR DE LUANDA

APPLICATIONS OF MEDICAL PHYSICS IN A HOSPITAL AT LUANDA

César Cordeiro Alves¹
Silva da Cruz²

RESUMO

Na actualidade, a Física Médica proporciona os fundamentos físicos de múltiplas técnicas terapêuticas, assegura a base científica para a compreensão e o desenvolvimento das modernas tecnologias que têm revolucionado o diagnóstico médico e estabelece os critérios para a correcta utilização dos agentes físicos utilizados na Medicina. Em coerência com esta realidade, cria-se a necessidade de incorporar físicos nos grandes hospitais. Na Clínica Girassol existe um Serviço de Física Médica com sete físicos cujas actividades distribuem-se pelos Serviços de Radioterapia, Medicina Nuclear e Imagiologia. O foco da sua actividade geral consiste na elaboração e implementação de programas de protecção e segurança radiológica, controlo de qualidade dos equipamentos emissores de radiação e na dosimetria ocupacional e ambiental. Realizam actividades específicas como a gestão dos resíduos radioactivos produzidos no Serviço de Medicina Nuclear, o planeamento dos tratamentos em Radioterapia externa e em Braquiterapia, assim como a classificação de áreas e dos profissionais expostos. O Serviço de Radioterapia dispõe de dois aceleradores lineares e uma máquina de inserção remota da fonte de Co-60 para os tratamentos de Braquiterapia de alta taxa de dose. O Serviço de Medicina Nuclear conta com uma câmara gama de duas cabeças e um laboratório quente para a eluição do Tc-99m. Neste trabalho apresentam-se as principais aplicações da Física Médica na Clínica Girassol, em Luanda.

Palavras chave: Radioterapia, Medicina Nuclear, Radiologia, Protecção Radiológica

EXTENDED ABSTRACT

Fundamentally, Medical Physics applies rules of physics to multiple therapeutic techniques, provides the scientific basis for understanding and developing the modern technologies that have revolutionized medical diagnosis and establishes the criteria for the correct use of physical agents used in medicine. Accordingly, there is a need to incorporate more physicists in the large, tertiary care hospitals. The Medical Physics Staff at Clínica Girassol is formed by seven Physicists who are allocated to the different areas of medical

¹ Clínica Girassol, cesar.alves@clinicagirassol.co.ao

² Clínica Girassol, silva.cruz@clinicagirassol.co.ao

services such as Radiotherapy, Nuclear Medicine and Radiology. The main focus of medical physics service is the development and implementation of radiological protection and safety programs, quality control of radiation emitting equipments and occupational and environmental dosimetry. They carry out specific activities such as the management of radioactive waste produced in the Nuclear Medicine Service, the planning of treatments in external beam radiotherapy and brachytherapy as well as the classification of areas and the exposed professionals. The radiotherapy Service has two linear accelerators and an afterloader working with Co-60 source for high dose rate brachytherapy treatments. The Nuclear Medicine Service has a two-head gamma camera and a hot laboratory for elution of Tc-99m generator. This work presents the main applications of Medical Physics in Clinica Girassol at Luanda.

INTRODUCTION

With the emergence of new treatment units (accelerators, remote afterloader in brachytherapy, etc.) and new diagnostic techniques (nuclear medicine, positron emission tomography, digital radiology, magnetic resonance, etc.) there is a notable increase in the number of physicists in hospitals around the world.

In Angola, until the end of the last century, physicists were not present in hospitals, due to the great deficiency in the use of radiation for therapeutic and diagnostic purposes. After the introduction of modern radiodiagnostic and radiotherapy techniques, the incorporation of physicists in hospitals began to grow quite sharply. With the creation of the Atomic Energy Regulatory Authority in 2007 and the legislation that regulates radiological protection (Diário da República, 2012) the presence of physicists in hospitals has become mandatory for the performance of radiation protection and quality control of radiological equipments.

Clinica Girassol is a tertiary care hospital with 220 beds and offers Radiotherapy, Nuclear Medicine and Radiology services among other services, with a considerable number of radiation sources. In this hospital, there is a Medical Physics Service (SFM) whose mission is to ensure the maintenance of adequate levels of radiological safety during medical exposures with ionizing radiation, for patients, professionals and the general public. In this way, one of its objectives is to properly manage all radiological equipment and dosimetry instruments, coordinating its acquisition and executing its quality control programs.

MATERIALS AND METHODS

The Medical Physics Service at Clínica Girassol consists of seven physicists, of which two are allocated to the nuclear medicine service and four are in the radiotherapy service. Diagnostic Radiology activities are shared by the entire team of physicists.

RADIOTHERAPY

The Radiotherapy Service is equipped with two Siemens Artiste linear accelerators with photon energies of 6 and 15 MV and electrons energies of 6, 8, 9, 12 and 15 MeV. These accelerators are equipped with 160 multi-leaf collimators, portal imaging systems and one of them has a CT on rails for image-guided treatments (IGRT). The CT on rails which is placed inside the treatment room bunker provides volumetric images similar to the images used in treatment planning. This allows for a direct comparison between planning CT images and verification CT images which helps to accurately irradiate target volumes and spare the organs at risk.

For planning external beam radiotherapy treatments, Nucletron Oncentra Master Plan software is used and the treatment simulation is performed using a 64 slice Siemens Somatom Sensation CT. SFM has dosimetry equipments, such as ionization chambers, electrometers, radiation field analyzer (IBA Bluephantom) using Ominipro Accept software.

In their daily routine, physicists participate in the acquisition of beam data for treatment planning, measure percentage depth doses (PDD) and beam profiles of linear accelerators. Therefore, they implement the accelerator quality control program, using international dosimetry protocols such as TRS 398 of the International Atomic Energy Agency - IAEA (IAEA, 2000) and TG 142 of the American Association of Medical Physics (AAPM) (Klein et al, 2009). Clinical dosimetry, which is carried out in close collaboration with the radio-oncologist, consists of planning, assessing and evaluating tumor dose, dose to organs at risk, so that the quality of treatment is optimal.

BRACHYTHERAPY

High dose rate Brachytherapy (HDR) treatments are performed with Eckert & Ziegler Bebig multisource remote afterloader machine, using a Co-60 source, a transrectal ultrasound (TRUS) for prostate brachytherapy cases and the 3-D treatment planning system is HDRplus.

NUCLEAR MEDICINE

The Nuclear Medicine Service of Clínica Girassol is the first nuclear medicine service in Angola which was inaugurated in 2012. This service has a multidisciplinary team composed by two physicians specialized in Nuclear Medicine, two physicists, three nuclear medicine technicians, one nurse and one receptionist. In their daily routine, physicists perform quality control of nuclear medicine equipments, determine the radiation activity that is administered to the patient and guarantee the safety and environmental quality of the workplaces

DIAGNOSTIC RADIOLOGY

The diagnostic radiology service is equipped with two Siemens CT scanners, one of which is the Somatom Definition Flash with two x-ray tubes, 2 MRI machines with 1.5 and 3.0 Tesla, fixed and portable X-ray machines, a C-arm for hemodynamics, portable C-arms, a mammograph, dental x-rays, ultrasound equipments. The main activities of physicists in the radiology service are the implementation of the quality control program for all radiological equipments and to carry out a radiological survey at its facilities. The interventions carried out in these equipments are always accompanied by a technician and are divided as follows:

- Four annual interventions for mammography equipment;
- Two annual interventions for CT scanners, Image Intensifiers and Ultrasound;
- An annual intervention in conventional radiology equipment., orthopantomography, bone densitometry.

AUDIT OF RADIOLOGICAL PROTECTION CONDITIONS

Physicists carry out radiological protection activities in all facilities that have radiation emitting equipment. The verification of radiation levels in workstations and in all places accessible to the public is carried out at least annually.

MAIN CONSTRAINTS

SFM faces an enormous difficulty in guaranteeing the training of its physicists, in the field of Medical Physics. The country does not have medical physics courses and it is necessary to train them abroad. Another major constraint is the poor technical assistance of the equipment, with particular

emphasis on linear accelerators. The personnel dosimetry of the exposed professionals also faces some difficulties, due to the failure of the dosimetric equipment of the company that provides this service. Finally, it is important to highlight the great difficulty that the SFM faces for the calibration of its radiation measurement instruments since they must be sent to a secondary laboratory outside the country.

Keywords: Radiotherapy, Nuclear Medicine, Radiology, Radiological Protection.

INTRODUÇÃO

A Física Médica é uma ciência aplicada que consiste na utilização de princípios, conceitos, métodos e técnicas de Física na Medicina para a prevenção, o diagnóstico e o tratamento de doenças com o objectivo específico de melhorar a saúde e o bem-estar dos seres humanos. Os Físicos Médicos são profissionais com um grau universitário ou equivalente em Física, matemáticas, informática, química física, mecânica, engenharia eléctrica ou electrónica, etc. que, usando princípios e métodos científicos, trabalham em colaboração com o pessoal médico em hospitais, universidades e/ou centros de investigação.

O desenvolvimento mais importante da Física Médica, tal como a entendemos na actualidade, ocorre após as descobertas dos raios X e da radioactividade, devido ao seu grande impacto no moderno diagnóstico e na terapêutica médicas. Essas descobertas marcam um ponto histórico na aplicação dos agentes físicos na Medicina, ao proporcionar métodos revolucionários de diagnóstico por imagem e tratamento com radiações. As aplicações da Física na medicina têm crescido consideravelmente desde princípios do século XX, em consonância com o incremento do uso de fontes de radiações nos hospitais. Com o aparecimento de novas unidades de tratamento (aceleradores, aparelhos de carga remota de fontes radioactivas em braquiterapia, etc.) e de diagnóstico (câmaras gama, tomógrafos por emissão de positrões, radiologia digital, ressonância magnética, etc.) tem-se verificado um aumento considerável do número de físicos nos hospitais de todo mundo.

Em Angola, até finais do século passado, não se verificava a presença de físicos nos hospitais, devido ao fraco apetrechamento de meios terapêuticos e de diagnóstico com radiações. Após a introdução das modernas técnicas de radiodiagnóstico e de radioterapia, a presença de físicos nas unidades hospitalares começou a crescer de um modo bastante acentuado. Com a criação da Autoridade Reguladora de Energia Atómica no ano de 2007 e da legislação que regula a protecção radiológica (Diário da República, 2012), tornou-se

obrigatória a presença de físicos nas unidades hospitalares para o desempenho de actividades de protecção radiológica e controlo de qualidade dos equipamentos emissores de radiação.

A Clínica Girassol é uma unidade hospitalar com 220 leitos e dispõe de serviços de Radioterapia, Medicina Nuclear e Imagiologia, com um número considerável de fontes emissoras de radiação. Nesta clínica existe um Serviço de Física Médica (SFM), cuja missão consiste em garantir a manutenção dos níveis adequados de segurança radiológica durante as exposições médicas com radiações ionizantes para os pacientes, para os profissionais e para o público em geral. Nesta senda, tem como um dos seus objectivos gerir de forma adequada todos os equipamentos radiológicos e os instrumentos de medida dessa radiação, coordenando a sua aquisição e executando os seus programas de controlo de qualidade. O SFM actua em todas as instalações que utilizam equipamentos emissores de radiação ionizante, mediante a dosimetria física, a dosimetria clínica, o controlo de qualidade e a protecção radiológica.

Na Medicina Nuclear, o SFM implementa o programa de controlo de qualidade dos equipamentos, tais como a câmara gama e os calibradores de dose, além de realizar avaliações individuais das doses recebidas pelos pacientes em procedimentos diagnósticos e terapêuticos com radiofármacos. Na Radioterapia o SFM efectua a dosimetria física dos aceleradores e dos equipamentos de Braquiterapia. Realiza também a dosimetria clínica individualizada dos pacientes de teleterapia e braquiterapia.

MATERIAIS E MÉTODOS

O Serviço de Física Médica da Clínica Girassol conta com sete físicos, dos quais dois são de nacionalidade indiana. No Serviço de Medicina Nuclear estão alocados dois físicos e na radioterapia funcionam quatro físicos. As actividades em Radiologia são partilhadas por toda a equipa de físicos.

RADIOTERAPIA

O Serviço de Radioterapia dispõe de dois aceleradores lineares de marca Siemens, modelo Artiste, que operam com energias dos fotões de 6 e 15 MV e para os electrões estão disponíveis as energias de 6, 8, 9, 12 e 15 MeV. Estes aceleradores estão equipados com colimadores multilâminas (MLC) de 160 lâminas, sistemas de imagem portal (EPID) e um deles dispõe de um TC sobre carris para os tratamentos guiados por imagem (IGRT). O TC sobre carris colocado na sala de tratamento proporciona uma imagem volumétrica de alto contraste, semelhante às imagens usadas no planeamento do tratamento.

Isto permite uma comparação directa entre ambas as imagens que dá a possibilidade de detalhar com precisão a localização das estruturas a irradiar.

Para o planeamento dos tratamentos de radioterapia externa, utiliza-se o software Nucletron Oncentra Master Plan e a simulação dos tratamentos é feita num TC de 64 cortes (Somatom Sensation, Siemens).

Para a actividade de dosimetria física dos aceleradores o SFM dispõe de equipamentos dosimétricos, tais como câmaras de ionização, electrómetros, analisador de campo de radiação (Bluephantom - IBA), que usa o software Ominpro Accept da IBA.



FIGURA 1. Acelerador Artiste-Siemens, com o TC sobre carris incorporado na sala de tratamento.

PRINCIPAIS ACTIVIDADES EM RADIOTERAPIA EXTERNA

O SFM responsabiliza-se pela dosimetria física e clínica das radiações ionizantes e pela protecção radiológica das instalações de radioterapia, dos profissionais e dos pacientes. Mediante a dosimetria física caracterizam-se os feixes de radiação que são utilizados na terapia dos pacientes. Após a aquisição dos aceleradores, os físicos participaram dos testes de aceitação dessas máquinas e posteriormente efectuaram os testes para o estabelecimento dos níveis de referência inicial (*commissioning*). Na sua rotina diária, esses profissionais participam na aquisição de dados para o planeamento dos tratamentos, medem os rendimentos de doses em profundidade (PDD) e os perfis do feixe de radiação dos aceleradores lineares (LINACs). Em suma, implementam o controlo de qualidade dos aceleradores, dos sistemas de cálculo e dos instrumentos de medida da radiação. Para tal, usam protocolos internacionais,

tais como o TRS 398 da Agência Internacional de Energia Atômica IAEA) (International Atomic Energy Agency, 2000) e o TG 142 da Associação Americana de Física Médica (AAPM) (Klein et al., 2009). A Tabela 1 apresenta os principais testes que são realizados em ambos os aceleradores e que se encontram descritos nos Procedimentos Operacionais Padrão (POPs) do SFM. A dosimetria clínica, que se realiza em estreita colaboração com o médico radio-oncologista, consiste na avaliação das doses administradas ao paciente, de modo que a qualidade do tratamento seja ótima.

TABELA 1. Testes de Controlo de Qualidade que se realizam nos aceleradores do Serviço de Radioterapia da Clínica Girassol.

Tipo de Testes	Diário	Mensal	Anual
Dosimétricos	Constância da saída dos fótons (6 MV e 15 MV)	Idem	Idem
	Verificação do <i>índice</i> de qualidade do feixe de raios-X	Idem	Idem
		Constância da saída dos electrões (6, 8, 9, 12, 15 MeV)	Idem
		Perfis dos fótons	Idem
		Perfis dos electrões	Idem
Mecânicos	Alinhamento do laser (< 2mm)	Idem	Idem
	Indicador Óptico de Distância (< 2mm)	Idem	Idem
		Coincidência entre o campo de luz e o da radiação	Idem
		Indicador do tamanho do campo	Idem
		Verificação do Isocentro mecânico	Idem
		Escalas dos Movimentos da Mesa de Tratamento	Idem
			Paralelismo e ortogonalidade das mandíbulas
			Simetria das mandíbulas
			Distância do movimento assimétrico
Segurança	Monitor audiovisual	Idem	Idem
	Bloqueio da porta de entrada do <i>bunker</i>	Idem	Idem
	Indicador de radiação em curso	Idem	Idem
		Botão de emergência para interrupção da radiação	Idem
		Bloqueio de cunhas	Idem
		Bloqueio para aplicadores de electrões	Idem

FONTE: Os Autores.

BRAQUITERAPIA

Os tratamentos de Braquiterapia de alta taxa de dose (HDR) são realizados com uma máquina de carregamento remoto da Eckert & Ziegler Bebig, utilizando uma fonte de Co-60, um ecógrafo transrectal (TRUS) para tratamentos de cancro da próstata e o sistema de planeamento 3-D é o HDRplus. A sala dos tratamentos de Braquiterapia está ilustrada na Figura 2.

Os físicos participam nos testes de aceitação das novas unidades de tratamento e sempre que for necessária qualquer intervenção correctiva nessas unidades. Providenciam a calibração dos instrumentos de medida da radiação com uma periodicidade bianual e efectuam cálculos dosimétricos após a mudança da fonte radioactiva. Garantem o controlo de qualidade das unidades de tratamento, dos sistemas de cálculo e de toda a instrumentação de Braquiterapia, de acordo com as normas e recomendações nacional e internacional.



FIGURA 2. Sala de tratamento de Braquiterapia do Serviço de Radioterapia da Clínica Girassol.

MEDICINA NUCLEAR

A Medicina Nuclear é uma especialidade médica que utiliza fontes radioactivas não seladas com finalidades diagnóstica e terapêutica. O Serviço de Medicina Nuclear da Clínica Girassol é o primeiro serviço de medicina nuclear em Angola e foi inaugurado em agosto de 2012. Este serviço integra uma equipa multidisciplinar composta por dois médicos especialistas em Medicina Nuclear, dois físicos, três técnicos superiores de Medicina Nuclear, um técnico de enfermagem e um recepcionista.

Em termos de equipamentos, o serviço dispõe de uma Câmara-Gama com dois detectores (Figura 3), uma estação de aquisição/processamento, dois calibradores de dose, uma câmara de fluxo laminar, monitores de radiação, fontes radioactivas, gerador de $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ importado da África do Sul com periodicidade bimensal, *kits* para marcação dos radiofármacos, diversos equipamentos de protecção individual, equipamento para realização de provas de esforço e *kits* de descontaminação. Para a implantação desse serviço os físicos debruçaram-se sobre diversos aspectos, onde destacam-se os seguintes pontos:

- Planeamento/estudo sobre as instalações, de acordo com a legislação em vigor, tendo em conta diferentes aspectos relativos à estrutura do serviço, à natureza da actividade que se previa realizar e ao nível de exposição radiológica inerente à mesma;
- Verificação das condições de protecção e segurança radiológica das instalações, antes do início das suas actividades com os pacientes;
- Pedido de licenciamento à Autoridade Reguladora;
- Elaboração e implementação do programa de protecção e segurança radiológica e do programa de controlo de qualidade dos equipamentos.

Na sua rotina diária, os físicos fazem a gestão dos equipamentos de Medicina Nuclear, determinam a actividade que é administrada no paciente e garantem a segurança e a qualidade ambiental dos postos de trabalho mediante a vigilância da radiação e da contaminação radiológica, assim como a vigilância e a gestão dos resíduos radioactivos sólidos produzidos.



FIGURA 3. Câmara-Gama modelo E-Cam, Siemens.

IMAGIOLOGIA

O Serviço de Imagiologia dispõe de dois TC de marca Siemens, sendo um deles o Somatom Definition Flash com dois tubos de raios X, aparelhos de raios X fixos e portáteis, um arco em C para Hemodinâmica, arcos em C portáteis, um mamógrafo, aparelhos de raios X dental, ecógrafos e duas ressonâncias de 1.5 e 3 Tesla, respectivamente. As principais actividades dos físicos no Serviço de Imagiologia consistem em implementar o programa de controlo de qualidade dos equipamentos.

PROGRAMA DE CONTROLO DE QUALIDADE DOS EQUIPAMENTOS

Foi elaborado um programa de Controlo de Qualidade e Calibração de Equipamentos radiológicos. Com base nesse Programa, realiza-se um conjunto de testes periódicos em todos os equipamentos radiológicos que abrangem as exigências legais e as recomendações nacionais e internacionais, com elaboração de relatórios detalhados acerca do estado de cada equipamento no que se refere à imagem e à dose de radiação.

A existência de um Programa de Controlo de Qualidade dos equipamentos permite à Clínica Girassol ter uma informação rigorosa acerca da evolução temporal das características de funcionamento dos aparelhos e, portanto, po-

der avaliar com maior rigor e menor incerteza temporal as eventuais necessidades de substituição dos diversos aparelhos, retirando destas decisões alguns critérios de aleatoriedade e introduzindo maior racionalidade na decisão.

As intervenções que os físicos efectuam nos aparelhos são sempre acompanhadas por um técnico do serviço e estão divididas da seguinte forma:

- quatro intervenções anuais ao equipamento de mamografia;
- duas intervenções anuais aos TC's, intensificadores de imagem e ultrassons;
- uma intervenção anual nos equipamentos de radiologia convencional (fixo e/ou portátil), ortopantomografia, densitometria óssea.

AUDITORIA ÀS CONDIÇÕES DE PROTECÇÃO RADIOLÓGICA

Os físicos realizam auditorias de protecção (com implementação de medições *in loco*) e segurança radiológicas nas instalações que possuem equipamento radiológico. A verificação dos níveis de radiação nos postos de trabalho e em todos os lugares acessíveis ao público é efectuada com uma periodicidade mínima anual. A auditoria inclui as seguintes etapas:

- análise das “zonas controladas” e “zonas vigiadas”, bem como da sinalização existente e da sua adequação face ao tipo de utilização que têm;
- procedimentos de detecção de utentes grávidas;
- cumprimento das condições de aceitabilidade das instalações e dos equipamentos;
- dispositivos de segurança e protecção às pessoas;
- análise do programa de manutenção e revisões preventivas dos equipamentos;
- programa de vigilância dos níveis de radiação;
- classificação de zonas radiológicas e do pessoal profissionalmente exposto;
- inspecção e análise periódica das blindagens estruturais.

PRINCIPAIS CONSTRANGIMENTOS

O SFM depara-se com uma enorme dificuldade em garantir a formação dos seus físicos na especialidade de Física Médica. O país não dispõe de cursos de Física Médica, sendo necessária a sua formação no exterior. Outro grande constrangimento consiste na fraca assistência técnica dos equipamentos, com particular realce para os aceleradores lineares. As máquinas chegam a ficar longos períodos em inactividade à espera de substituição das peças avariadas. A dosimetria individual dos profissionais expostos também depara-

-se com algumas dificuldades, devido às frequentes avarias dos equipamentos dosimétricos da empresa que presta este serviço. Finalmente, é importante realçar a grande dificuldade que o SFM tem para a calibração dos seus instrumentos de medida da radiação, uma vez que os mesmos devem ser enviados para um laboratório secundário no exterior.

REFERÊNCIAS

Diário da República. (2012). *Decreto Presidencial n° 12/12*. Regulamento sobre Radioprotecção, DR, I Série 17, 25 Janeiro.

International Atomic Energy Agency. (2000). *TRS-398 – Absorbed dose determination in external beam radiotherapy*: An international code of practice for dosimetry based on standards of absorbed dose to water. Vienna, Austria.

Klein, E. E. et al. (2009). Task Group Report – Quality assurance of medical accelerators. *Medical Physics*, 36(9), September.

FÍSICA E ENSINO

A INFLUÊNCIA DO USO DAS FERRAMENTAS DO MATLAB NA COMPREENSÃO DE RADIAÇÃO DE ONDAS ELETROMAGNÉTICAS E ANTENAS

THE INFLUENCE OF USING MATLAB TOOLS ON UNDERSTANDING RADIATION OF ELETROMAGNETIC WAVES AND ANTENNAS

Sónia Maria Vaz Semedo¹
Kate Azar²

RESUMO

O ensino e a aprendizagem baseados em computador vêm sendo disseminados cada vez mais e isso tem sido um importante contributo, principalmente em áreas complexas como a Física, que requerem uma predisposição para a abstração. Neste trabalho, estuda-se a influência do uso das ferramentas do Matlab no sucesso da aprendizagem de conceitos da radiação eletromagnética e de antenas. Nas aulas de Antenas foi introduzido o Matlab para criar programas que permitam a visualização dos parâmetros fundamentais de antenas. O estudo foi efetuado em três turmas, entre março de 2017 e julho de 2018. Na primeira turma, focou-se na teoria e na resolução de exercícios, tendo terminado com uma taxa de aprovação de 72%. Na segunda turma, as aulas teóricas foram suportadas com aulas práticas usando Matlab para uma melhor visualização de alguns parâmetros fundamentais do dipolo elétrico, obtendo uma taxa de aprovação de 75%. Os estudantes da turma III desenvolveram projetos, onde criaram interfaces gráficas interativas nas quais o utilizador pode escolher os parâmetros que quer visualizar. Esta última turma teve uma taxa de aprovação de 90,9%. A análise dos resultados permite concluir que a utilização das valências computacionais dos estudantes na criação de programas que permitam uma melhor visualização dos conceitos contribui para o sucesso da disciplina.

Palavras-chave: Antenas, Radiação eletromagnética, Matlab.

EXTENDED ABSTRACT

Computer-based teaching and learning is becoming increasingly widespread and has been an important tool to more abstract subjects such as Physics. In this paper, we study the influence of the use of Matlab on the pass rate in courses on electromagnetic radiation and antennas. In Antenna classes, Matlab was introduced to create programs that allow for the visualization of fundamental parameters of antennas. The study was conducted in three class-

¹ Grupo Disciplinar de Física, Eletrotecnia e Energia da Universidade de Cabo Verde, sonia.semedo@docente.unicv.edu.cv

² Physics Class of 2021, Wellesley College, kazar@wellesley.edu

es, between March 2017 and July 2018. The first class was taught without using Matlab as a supplement to the course material and had a pass rate of 72%. The second class incorporated Matlab to help students visualize the fundamental parameters of electric dipoles, which resulted in a pass rate of 75%. The third class had students use Matlab to create graphical interfaces in which users could choose parameters to visualize. This course had a 90.9% pass rate. The analysis of the results allows us to conclude that the use of Matlab as a visualization tool contributes to the success of students in this course.

INTRODUCTION

The teaching and learning of physics poses great challenges, because it requires a clear exposition and understanding of often abstract concepts. Laboratory experiments provide students a clear visualization of the class concepts, helping students overcome the challenge of understanding the abstract ideas in the course. However, depending on the complexity of the subject or the laboratory resources an appropriate experiment requires, it can be difficult to provide adequate visualization tools for students. In these situations, we may resort to simulation tools or numerous online platforms as an alternative teaching method.

These are the cases of Electromagnetic Waves Propagation and Antenna courses in Electrical Engineering from Faculty of Science and Technology at University of Cabo Verde (www.unicv.edu.cv), where the resources needed for laboratory class are scarce or inexistent. In these courses we have used Matlab to create simulations to help students understand and visualize electromagnetic wave propagation and radiation. This approach has been published in the literature (Nogueira, Alves, & Marques, 2019; Li & Lv, 2017; Yetilmezsoy & Mungan, 2018; Naim, Fisal, Sarnin, & Ya'acob, 2018; Price & Price-Mohr, 2019; González-Coma, Maneiro-Catoira, Castro, & Brégains, 2015). Robert Nogueira et al. (Nogueira et al., 2019) presented a case study where students modelled the electric and magnetic fields using simulations in Matlab and the students' satisfaction with the simulation practices through MATLAB® programming was recorded. González-Coma (González-Coma, Maneiro-Catoira, Castro, & Brégains, 2015) developed a graphical user interface in Matlab for Conformal Antenna Array analysis and showed it to be a useful tool with which students can perform instructive experiments to visualize the theoretical concepts taught in the classroom lectures. From these studies, it is clear that the incorporation of Matlab into course curricula influences student learning of class concepts, and consequently students' success in the course. In this paper, we explore this hypothesis.

MATERIAL AND METHODS

A new teaching approach has been tested in our Antenna classes, where students' Matlab skills are harnessed to create programs that enable them to visualize fundamental parameters of antennas.

The study was conducted in three classes, between March 2017 and July 2018. Table 1 presents the characteristics of the groups under study.

TABLE 1. Description of the groups in study.

Identification	Start date	End date	Number of students
Group I	March 2017	July 2017	11
Group II	October 2017	February 2018	8
Group III	March 2018	July 2018	11

The Group I classes involved the theoretical analysis and problem solving of a traditional lecture course and included a Matlab course in which students were able to use the software to visualize the fundamental parameters of an electric dipole. The codes created for the electric dipole could be adapted to other types of antennas. Group I was chosen as the control group.

In addition to the material covered by courses in Group I, Groups II and III had students create graphical user interfaces in Matlab that allowed a user to select fundamental parameters to view for a given antenna type.

FUNDAMENTAL PARAMETERS OF ANTENNAS

The fundamental parameters of an antenna can be defined as a function of the electromagnetic fields created by the antenna radiation, see bibliography. If we know the electric field $E(r, \theta, \phi)$ and the magnetic field $H(r, \theta, \phi)$ radiated by an antenna, we can determine in the far-field region (Balanis, 2016):

- Radiation Power Density, $W_{rad} = \frac{1}{2} Re(E \times H^*)$;
- Radiation Intensity, $U = r^2 W_{rad} = \frac{r^2}{2\eta} |E(r, \theta, \phi)|^2$;
- Radiated Power, $P_{rad} = \frac{1}{2} \oint\!\!\!\oint Re(E \times H^*)$;
- Directivity, $D(\theta, \phi) = \frac{4\pi U}{P_{rad}}$;
- Maximum Effective Area, $A_{em} = \frac{\lambda^2}{4\pi} D_0$.

Based on the magnetic or the electric field, we can also determine the radiation pattern, the first null beamwidth (FNBW), and the half-power beamwidth (HPBW). In the following section we can see two of the development projects.

RESULTS

INFINITESIMAL DIPOLE ANTENNA

In far-field region, the electric field expression of an infinitesimal electric dipole can be approximated as

$$E_{\theta} \approx j\eta \frac{kI_0 l e^{-jkr}}{4\pi r} \sin(\theta)$$

This simplification helps us to compare the theoretical solutions with the numerical Matlab solutions.

Figure 1 shows the developed interface, where the user enters the antenna frequency and length, and the fundamental parameters are computed automatically. We can also see the three-dimensional radiation pattern of electric field of the infinitesimal dipole.

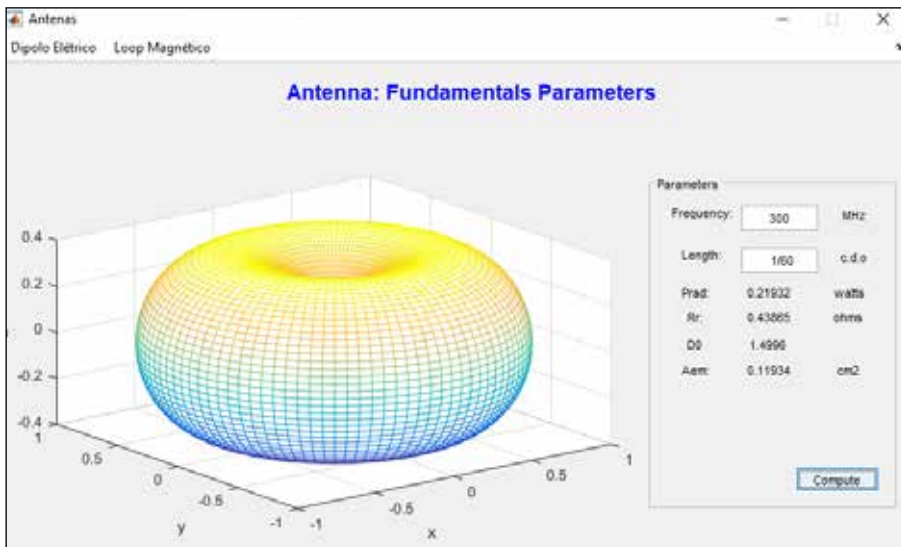


FIGURE 1. Outward appearance of the main interface of the tool with the 3D radiation pattern and the values of some fundamental parameters of a dipole with length .

MICROSTRIP ANTENNA

Microstrip antennas can be used on aircraft, satellite, radio, and wireless communications applications where size, weight, cost, performance, ease of installation, and aerodynamic profile are the main constraints.

In this interface the user chooses the frequency, relative dielectric constant, substrate height, and open voltage that they wish to use. The antenna parameters and subsequent data are determined based on these inputs. The user can choose from the fundamental parameters of the antenna, the antenna structure, the antenna data, and the two or three-dimensional radiation pattern what they wish to visualize. The figures below show the functions of this interface. The electric field used here was given by Cavity model as

$$E\phi \approx +j \frac{V_0 e^{-jk_0 r}}{\pi r} \left\{ \sin \theta \frac{\sin \left(\frac{k_0 W}{2} \cos \theta \right)}{\cos \theta} \right\}$$



FIGURE 2. Outward appearance of the main interface of the tool with antenna data selected.



FIGURE 3. Outward appearance of the main interface of the tool with antenna fundamental parameter selected.

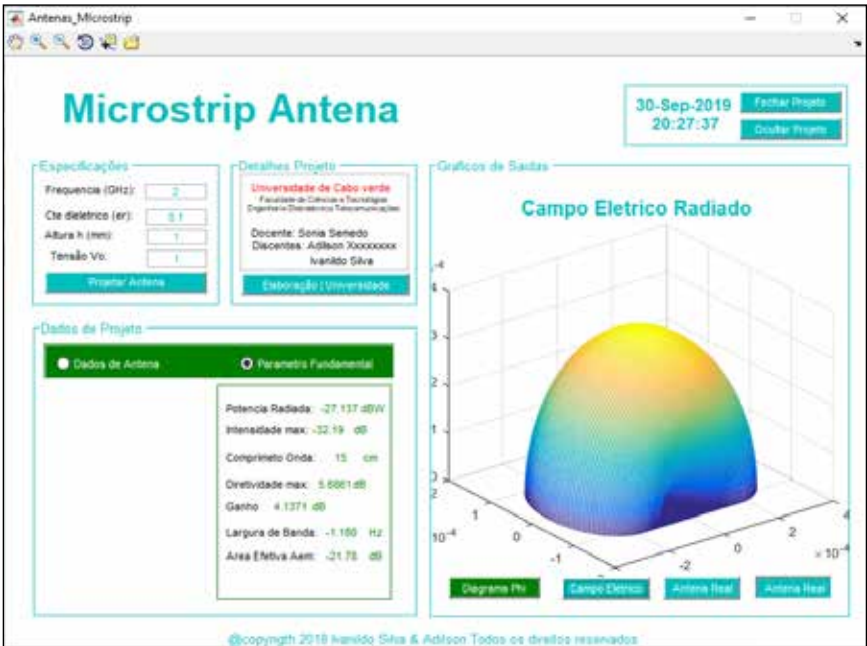


FIGURE 4. Outward appearance of the main interface of the tool with the 3D Radiation pattern and fundamental parameters selected.

CONCLUSION

At the end of each semester, the success rate for each class was quantified. Group I had a pass rate of 72%. In the second class, 75% of the students were successful. The third class had a 90.9% pass rate. We can see a substantial increase in the success rate, with both the second and third group, which we attribute to the use of Matlab as a supplemental instructional tool, as well as the switch from a lecture style course to a laboratory-based course. Providing students with example applications of the course material allowed for healthy competition between students which increased student engagement

The introduction of practical classes in Matlab was a strategy employed to help students understand the fields radiated by antennas as a replacement for laboratory experiments that would require resources that are beyond the university's capability to provide for students. The analysis of the results allows us to conclude that the use of students' computer skills in the creation of programs that allow for a better visualization of the concepts of electromagnetic radiation contributed to the success of the discipline and the motivation of the students.

Key-words: Antenna, electromagnetic radiation, Matlab.

INTRODUÇÃO

O ensino e a aprendizagem da Física acarretam grandes desafios, pois exigem uma clara exposição e a compreensão de conceitos muitas vezes abstratos. Estes desafios podem ser superados com experiências em laboratórios que permitam uma melhor exposição e contextualização dos conceitos da Física. No entanto, dependendo da complexidade do assunto a ser abordado, muitas vezes, por razões diversas, as experiências são difíceis de materializar, e nestas situações recorrem-se às ferramentas de simulações ou às inúmeras plataformas *on-line* como método alternativo.

Este é o caso do ensino das unidades curriculares, Propagação e Radiação de Ondas eletromagnéticas (PROE) e Antenas, lecionadas no curso de Engenharia Eletrotécnica na Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Cabo Verde. Muitos dos conceitos apresentados nestas unidades curriculares exigem uma predisposição para abstração e as experiências laboratoriais auxiliam os discentes na assimilação destes conceitos. No entanto, os recursos para aulas laboratoriais são escassos ou inexistentes, fazendo com que os docentes recorram a ferramentas de simulação para a realização de aulas práticas destas unidades curriculares. Assim, o domínio das ferramentas computacionais por parte dos discentes influencia o grau de assimilação dos conceitos físicos expostos nestas unidades curriculares.

Na literatura têm surgido vários trabalhos que demonstram que o uso de novas tecnologias pode contribuir para o sucesso da aprendizagem da (Nogueira et al., 2019; Li & Lv, 2017; Yetilmezsoy & Mungan, 2018; Naim et al., 2018; Price & Price-Mohr, 2019; González-Coma et al., 2015). Robert Nogueira et al. (2019) apresentaram um estudo de caso onde os estudantes modelaram e visualizaram os campos elétrico e magnético utilizando simulações no Matlab. González-Coma et al. (2015) desenvolveram uma interface gráfica de utilizador no Matlab para a análise de agregados de antenas conformais, mostrando ser uma ferramenta útil para o entendimento da configuração e radiação dos agregados.

Neste trabalho, estudamos a influência do uso do Matlab no sucesso da aprendizagem da Física, especificamente de conceitos da radiação eletromagnética. Nas nossas aulas de Antenas tem sido testada uma nova abordagem de ensino, onde são aproveitadas as competências computacionais em Matlab dos estudantes para criar programas que permitam a visualização dos parâmetros fundamentais de antenas.

METODOLOGIA

O estudo foi efetuado em três turmas, entre março de 2017 e julho de 2018. A Tabela 1 apresenta as características das turmas em estudo.

TABELA 1. Descrição das características das turmas em estudo.

Identificação	Data de início	Data de fim	Número de estudantes
Turma I	Março 2017	Julho 2017	11
Turma II	Outubro 2017	Fevereiro 2018	8
Turma III	Março 2018	Julho 2018	11

Na primeira turma, as aulas iniciaram em março de 2017 e a metodologia baseou-se na análise teórica, na resolução de exercícios e em aulas práticas com o Matlab para uma melhor visualização de alguns parâmetros fundamentais do dipolo elétrico. Os códigos criados para o dipolo elétrico podiam ser adaptados para outros tipos de antenas. A Turma I foi escolhida como turma controlo.

A Turma II começou em outubro de 2017 e em março de 2018 iniciaram as aulas da Turma III. Nestas turmas, para além da fundamentação teórica com resolução de exercícios, os estudantes tiveram que criar interfaces gráficas para utilizadores no Matlab, onde os utilizadores podiam escolher os parâmetros que queriam visualizar para um dado tipo de antena.

Independente da metodologia utilizada para as aulas, os estudantes devem ser capazes de determinar os parâmetros fundamentais de uma dada

antena a partir da sua expressão do campo elétrico ou magnético para a zona distante. Após uma fundamentação teórica sobre os parâmetros fundamentais, segue uma aula prática onde os estudantes desenvolvem códigos no Matlab, com a ajuda do docente, para avaliar o dipolo elétrico infinitesimal. Finda a validação do código, os estudantes devem adaptar o código para funcionar com outras antenas em estudo.

PARÂMETROS FUNDAMENTAIS DE UMA ANTENA

Seguindo a bibliografia da disciplina (Balanis, 2016), podemos definir os parâmetros fundamentais em função dos campos eletromagnéticos criados pela radiação da antena.

Conhecendo o campo elétrico $E(r, \theta, \phi)$ e o campo magnético $H(r, \theta, \phi)$, radiado por uma antena, podemos determinar para a zona distante a:

- Densidade de Potência radiada, $W_{rad} = \frac{1}{2} \text{Re}(E \times H^*)$;
- Intensidade de Radiação, $U = r^2 W_{rad} = \frac{r^2}{2\eta} |E(r, \theta, \phi)|^2$;
- Potência Radiada, $P_{rad} = \frac{1}{2} \oint \oint \text{Re}(E \times H^*)$;
- Diretividade, $D(\theta, \phi) = \frac{4\pi U}{P_{rad}}$;
- Área efetiva máxima, $A_{em} = \frac{\lambda^2}{4\pi} D_0$.

A partir do campo podemos também determinar o diagrama de radiação, a largura do feixe no primeiro nulo e a largura do feixe a meia potência. Na seção seguinte, podemos ver alguns dos projetos desenvolvidos.

RESULTADOS

ANTENA DIPOLO INFINITESIMAL

A expressão do campo elétrico deste tipo de antena é $E_\theta \approx j\eta \frac{kI_0 l e^{-jkr}}{4\pi r} \sin(\theta)$.

A Figura 5 apresenta a interface desenvolvida, onde o utilizador introduz a frequência e o comprimento da antena, e os parâmetros fundamentais são calculados automaticamente.

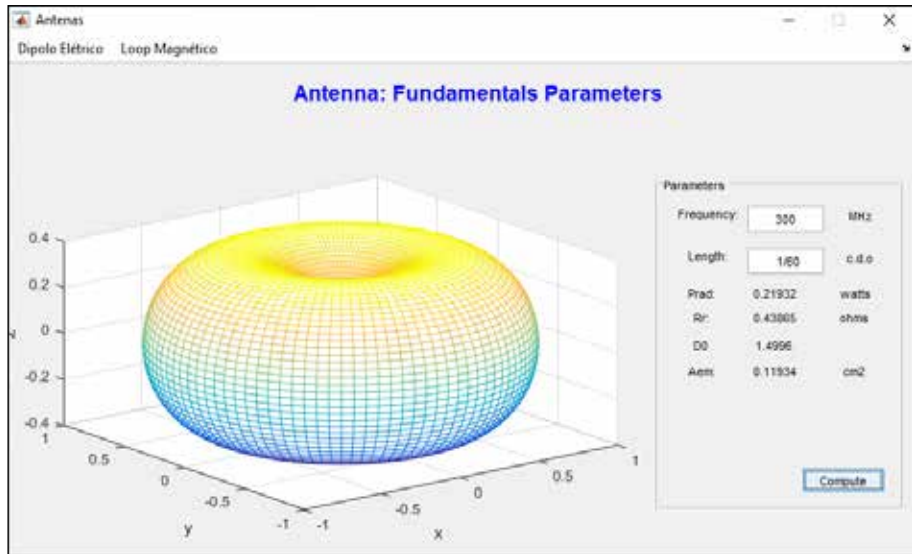


FIGURA 5. Tela do dipolo elétrico infinitesimal, com os parâmetros e o diagrama de radiação em 3-D.

ANTENAS IMPRENSAS

Nesta interface o utilizador introduz a frequência, a constante do dieléctrico, a altura do substrato e a tensão em aberto. Os dados e os parâmetros da antenna são determinados com base nessas entradas. As figuras abaixo apresentam as funções desta interface. O campo eléctrico foi determinado utilizando o modelo de Cavidade, como:

$$E\phi \approx +j \frac{V_0 e^{-jk_0 r}}{\pi r} \left\{ \sin \theta \frac{\sin \left(\frac{k_0 W}{2} \cos \theta \right)}{\cos \theta} \right\}$$

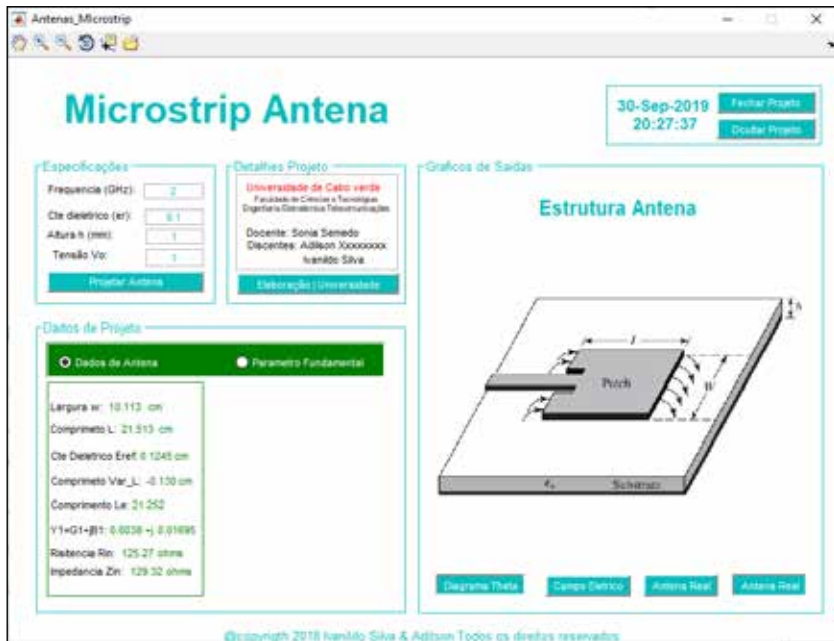


FIGURA 6. Tela do dimensionamento da antena.

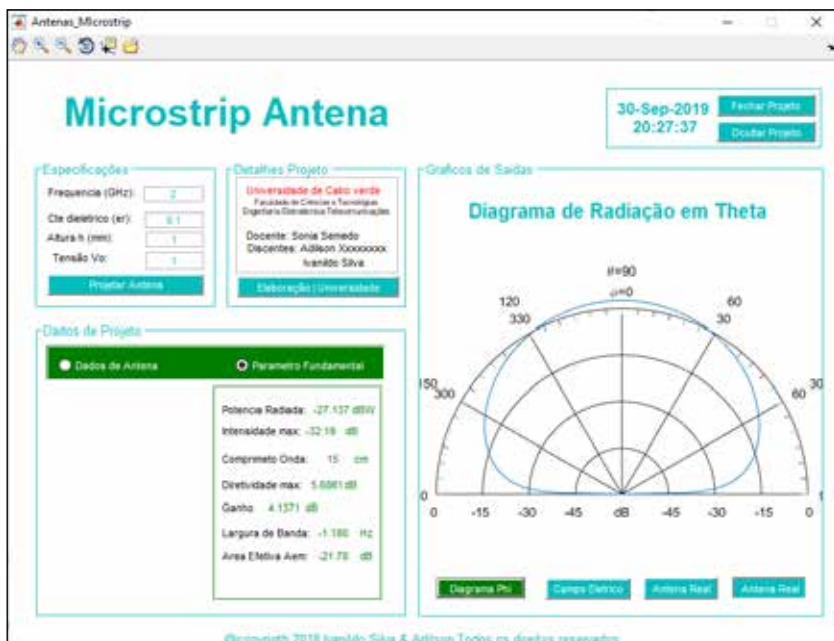


FIGURA 7. Tela com os parâmetros fundamentais da antena e o diagrama de radiação em duas dimensões.

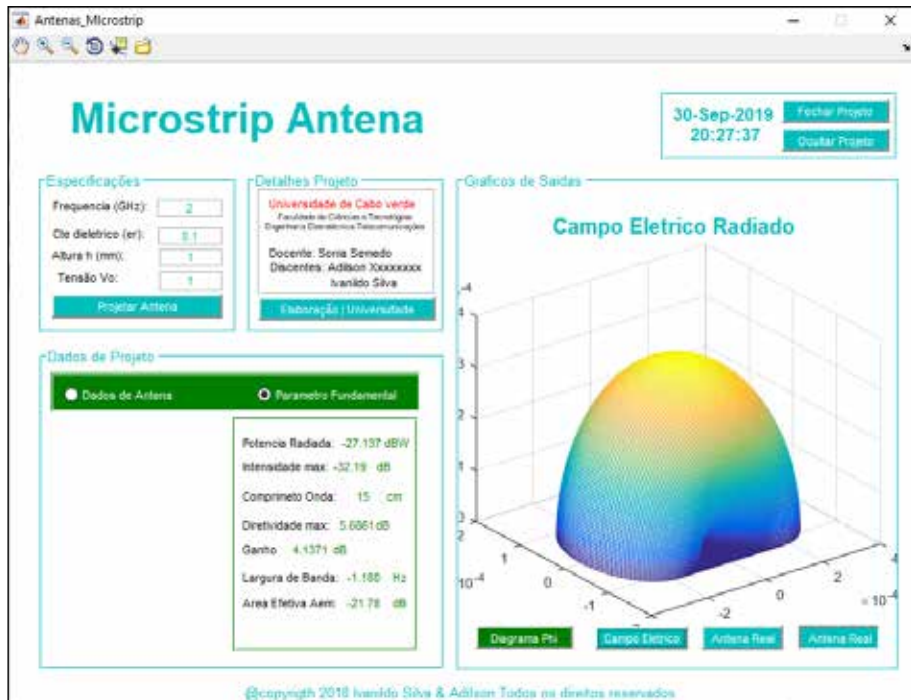


FIGURA 8. Tela com os parâmetros fundamentais da antena e o diagrama de radiação em três dimensões.

CONCLUSÕES

No final de cada semestre quantificou-se a taxa de aprovação de cada turma. A Turma I teve uma taxa de aprovação de 72%. Na segunda turma, 75% dos estudantes obtiveram sucesso na disciplina. A terceira turma teve uma taxa de aprovação de 90,9% na unidade curricular de Antenas. Podemos observar um incremento substancial na taxa de aprovação e este facto pode ser explicado grandemente pela introdução do uso da ferramenta Matlab. O desenvolvimento de aplicações desperta mais atenção e incrementou a motivação dos alunos, além de incentivar uma competição saudável entre eles.

A introdução das aulas práticas do Matlab foi uma estratégia para minimizar os efeitos dos poucos recursos laboratoriais e melhorar as noções dos campos radiados por antenas. A análise dos resultados permite concluir que a utilização das valências computacionais dos estudantes na criação de programas que permitam uma melhor visualização dos conceitos de radiação eletromagnética contribui para o sucesso da disciplina e a motivação dos alunos.

REFERENCES

- Balanis, C. A. (2016). *Antenna theory: Analysis and design*. New Jersey: John Wiley & Sons.
- González-Coma, J., Maneiro-Catoira, R., Castro, P., & Brégains, J. (2015). *A Software Interface as a Teaching Tool for Analysing Conformal Antenna Arrays*. 1st International Conference On Higher Education Advances (HEAD' 15), 67-74. <https://doi.org/10.4995/HEAD15.2015.404>
- Li, X., & Lv, Y. (2017). *Effective approach to spectroscopy and spectral analysis techniques using Matlab*. 14th Conference on Education and Training in Optics and Photonics: ETOP 2017, 10452, 1045255. <https://doi.org/10.1117/12.2269655>
- Naim, N. F., Fisal, M. F. K., Sarnin, S. S., & Ya'acob, N. (2018). Electrical Engineering Educational Software Based on Matlab and its Graphic User Interface (Gui). *Ijaedu-International e-Journal of Advances in Education*, 24-34. <https://doi.org/10.18768/ijaedu.415396>
- Nogueira, J. R., Alves, R., & Marques, P. C. (2019). Computational Programming as a Tool in the Teaching of Electromagnetism in Engineering Courses: Improving the Notion of Field. *Education Sciences*, 9(1), 64. <https://doi.org/10.3390/educsci9010064>
- Price, C. B., & Price-Mohr, R. (2019). PhysLab: A 3D virtual physics laboratory of simulated experiments for advanced physics learning. *Physics Education*, 54(3), 035006. <https://doi.org/10.1088/1361-6552/ab0005>
- Yetilmezsoy, K., & Mungan, C. E. (2018). MATLAB time-based simulations of projectile motion, pendulum oscillation, and water discharge. *European Journal of Physics*, 39(6), 065803. <https://doi.org/10.1088/1361-6404/aadaee>

UM MOOC COM UMA EXPERIÊNCIA REMOTAMENTE CONTROLADA E-LAB: ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DOS ALUNOS

A MOOC WITH AN E-LAB REMOTELY CONTROLLED EXPERIMENT: STUDENT BEHAVIOUR ANALYSIS

Rúben Cardoso¹
Manuel Santos²
Horácio Fernandes³
Victor Negîrneac⁴
Ana Moura Santos⁵

RESUMO

Uma cuidadosa análise das características e comportamentos dos participantes inscritos num curso MOOC Técnico com forte componente laboratorial relacionado com eletromagnetismo foi realizada de modo a melhor entender o que estes participantes pretendem alcançar com a sua inscrição no curso e como os conteúdos disponibilizados afetam o seu comportamento e seu sucesso global. Para tal, foram recolhidos dados ao longo de todo o período do curso que permitiram uma compreensão mais profunda das relações entre as estratégias pedagógicas e o comportamento dos participantes. Os resultados mostraram uma grande participação de pessoas externas à comunidade do Instituto Superior Técnico (IST) (alunos matriculados, professores, pesquisadores, funcionários, ex-alunos) e uma grande variedade de percursos académicos para os membros da sua comunidade. Os dados permitiram ainda afirmar que uma quantidade considerável dos participantes inscritos abandonou o curso quando as tarefas propostas se tornaram mais exigentes; no entanto, vários alunos continuaram motivados, tendo conseguido alcançar boas avaliações e a certificação final.

Palavras chave: MOOC, MOOL, remoto, educação.

EXTENDED ABSTRACT

A massive open online course (MOOC) is a carefully prepared course on a certain subject that can be accessed via the web and it's available to an unlimited number of participants. The open access, convenience and scalability

¹ Instituto Superior Técnico, ruben.cardoso@tecnico.ulisboa.pt

² Instituto Superior Técnico, manuelbbsantos@tecnico.ulisboa.pt

³ Instituto Superior Técnico, hf@ipfn.tecnico.ulisboa.pt

⁴ MOOC Técnico, victor.negirneac@tecnico.ulisboa.pt

⁵ MOOC Técnico, ana.moura.santos@tecnico.ulisboa.pt

ty of such on-line based courses make them an extremely interesting pedagogical tool because such characteristics allow the enrollment of diverse and large groups of participants. The term MOOC was coined in 2008 by Dave Cormier and has since then been widely used, both for cMOOCs, more organic courses focused around learner generated content, and xMOOCs which have educator generated content (often in the form of videos).

Notwithstanding all the advantages previously stated, there has been one main concern regarding MOOCs: attrition and drop out rates. The courses that are generally characterized by a large initial number of participants, regularly reaching a few thousands, but a very small number of effective completions. Throughout the courses progression, it's extremely frequent to see a considerable reduction in the number of participants: students stop watching the videos or reading the contents, many don't even attempt to participate in the evaluation and, consequently, very few reach the end of the course. Various studies place MOOC completion rates somewhere between 3 and 5% based on, or in 7,7% according to the report. However, one should take into account that "completion" rates, meaning completion of all assessment activities that enable participants to obtain a certificate, are not a good indicator, at least not the only indicator for the success of a MOOC, since different participants enroll in these courses with very distinct goals and, most of the times, these goals don't include completing the whole course. Instead, there are participants that are focused on learning only contents that they acknowledge as relevant and interesting. We intend to address this issue in the present paper, analyzing the behavior of students/participants in a specific MOOC produced and edited in Técnico Lisboa (IST), the largest Portuguese school of Architecture, Engineering, Science, and Technology, integrated in Universidade de Lisboa.

The present MOOC under analysis, besides being a bridging course, belongs to a special class: it involves the use of a Massive Open Online Laboratory – e-lab remote control laboratory – which constitutes a very relevant part of the course, regarding both its contents and evaluation. This bond between MOOC and MOOL makes this course specially interesting, enhancing the student experience by showing the connection between theory and experimental data.

In this article, a thorough analysis of the MOOC "Experimental Physics: Electromagnetism" is done, based on statistics collected from the final grade report generated by the MOOC Técnico's platform. Our discussion will focus mainly on attrition and completion rates and possible causes for drop out, considering effects of evaluations, peer review activities and hands-on and remote experimental sections. A deeper understanding of attrition statistics and causes combined with the understanding of how certain types of activities affect the participants will enable future changes on the course structure and its contents, contributing to improve the participant's learning experience.

The present MOOC had an attendance of 143 participants. This is considerably higher than the previous year in which it counted 105 participants. The increased number of students is a result of marketing maneuvers that have contributed to make MOOC Técnico courses more widely known, it also shows that people have interest in the MOOC concept and want to be a part of it when such a possibility arises.

A study regarding the characteristics of the participants was performed. The gender distribution of the participants is very balanced, counting with more than 40% of female participants.

The variation of active participants and their evaluation was also studied. As previously stated, one of the biggest concerns related to MOOC courses are the high attrition and drop out rates. In the present MOOC, these concerns were verified. The analysis of this data shows that several participants enrolled the course after its start, which explains the increase of participants from exercise 1 to exercise 2. It's also relevant to say that even for these first evaluation the number of participants that actually actively takes part in the course, about 50, composes only about 35% of the total number of enrolled students. One can also understand that as the activities started demanding more effort, requiring materials for the hands-on experiment or software installation for the remote experiment, a considerable amount of participants abandoned the course. However, after this decrease in attendance from exercise 2 to the practical experiment, the number of active participants remained approximately constant, showing that about 15 participants were committed to complete the whole course.

After the end of the course, a final grade based on a weighted average over the several evaluations already discussed is given to each student. There was a large fraction of the students with classifications below 20% which is a consequence of the high drop out rate. However, if the final grade analysis is focused on the students that were actually committed to most of the course, the final grade distribution becomes very different, indicating that the students who actively participated in the MOOC achieved good grades, reflecting the successful learning of the proposed topics.

As previously stated, the participants who were able to achieve a final grade above 60% received a certificate. These compose 10.1% of all the students enrolled in the course.

To sum up, the current MOOC course had an historically high number of participants which, even with a high drop out rate, resulted in a large number of students completing the whole course and obtaining a certificate. It's important to say that most of these participants are not part of IST community which reveals the far-reaching capacities of MOOC Técnico programme. Also, inside the IST community, students from several degrees decided to participate in the course which indicates the interest of the topic even for students

with a strong physics background. Regarding the number of participants, it's possible to conclude that a considerable amount of the enrolled participants never attempted any of the evaluations proposed and others abandoned this process when the tasks became more complex. Nonetheless, the students that were committed with the course were in general able to complete it with good grades. Finally, it's clear that students are open to a more connectivist approach, embracing cooperation and peer review tasks.

Key-words: MOOC, MOOL, remote, education.

INTRODUÇÃO

Um curso massivo *on-line* aberto (MOOC, em inglês) é um curso cuidadosamente preparado sobre um determinado assunto, que pode ser acessado via web e está disponível para um número ilimitado de participantes. O acesso aberto, a conveniência e a escalabilidade destes cursos *on-line* tornam-nos uma ferramenta pedagógica extremamente interessante, já que tais características permitem a inscrição de grupos de participantes muito diversificados e de grande dimensão. O termo MOOC foi cunhado em 2008 por Dave Cormier (Parr, 2013) e desde então tem sido amplamente utilizado, tanto para cMOOCs, cursos orgânicos mais focados em conteúdo gerado pelos alunos, e xMOOCs, cujos conteúdos são gerados por um educador (muitas vezes na forma de vídeos). Nos últimos anos, os MOOCs passaram por uma evolução considerável e os seus principais fornecedores oferecem xMOOCs, que tentam cada vez mais incorporar algumas características dos cMOOCs, como os fóruns de discussão e revisões por pares.

O acrónimo MOOC representa as quatro características mais relevantes e distintivas destes cursos:

- Massivo: a principal propriedade destes cursos é a sua escalabilidade extremamente simples, os conteúdos estão disponíveis *on-line* e o único limite máximo para o número de alunos matriculados é a capacidade do servidor, o que, na realidade, raramente é um problema, dado que todo o grupo nunca acessa os conteúdos simultaneamente. Mais ainda, a autonomia do curso, bastante necessária para que este possa ter um elevado número de participantes, é obtida por meio de testes automatizados, ou seja, momentos de avaliação (questionários) e avaliações por pares (baseadas em classificações efectuadas por outros estudantes);
- Aberto: outra característica bastante importante dos MOOCs é a facilidade de acesso e a falta de pré-requisitos para registo. Cursos diferentes podem ser executados com diferentes graus de acesso, in-

cluindo, por exemplo, conteúdo aberto, registo aberto ou inscrição acessível;

- *On-line*: a utilização da internet como canal de comunicação é crucial para o sucesso das duas propriedades anteriores. É esta que permite aos cursos alcançarem tantas pessoas diferentes de uma maneira aberta e livre de condições. Além disso, permite o uso de diversos recursos multimédia e interativos, não disponíveis nos canais pedagógicos clássicos, que melhoram e enriquecem a experiência de aprendizagem;
- Curso: por último, mas não menos importante, o grande objetivo dos MOOCs é ensinar e educar, portanto, as características anteriores só são relevantes se o curso contiver informações importantes de forma organizada e estruturada. Um curso organizado em torno do conteúdo gerado pelo educador pode ser definido por várias propriedades: ritmo, duração, intensidade, papel do instrutor e tutores, tipos de recursos utilizados e métodos de avaliação.

Dos pontos de vista social e pedagógico, todas estas características dos MOOCs têm uma imensa importância porque apenas a sua conjugação permite alcançar o objetivo final dos MOOCs: ensinar e partilhar conhecimento com a maior quantidade de pessoas possível, independentemente de seu estatuto socioeconómico ou estilo de vida e requerendo apenas acesso à internet e vontade de aprender. O advento e a democratização das tecnologias da informação e da internet, ocorridas ao longo do início do século XXI, permitiram que estas ferramentas alcançassem milhões de pessoas. A maior participação já registrada num único curso contou com aproximadamente 440.000 estudantes e a participação média em cursos dos principais fornecedores de MOOCs ronda os 25.000 alunos (Taxas de conclusão..., 2017; O FutureLearn..., 2016).

Apesar de todas as vantagens acima mencionadas, tem havido uma constante preocupação em relação aos MOOCs: as taxas de abandono. Estes cursos são geralmente caracterizados por um grande número inicial de participantes, atingindo regularmente alguns milhares; no entanto, apenas uma fracção bastante reduzida destes os conclui efectivamente. Ao longo da progressão dos cursos, é extremamente frequente ver uma redução considerável no número de participantes: os alunos param de assistir aos vídeos ou de ler os conteúdos, muitos nem tentam participar da avaliação e, consequentemente, muito poucos chegam ao final do curso. Vários estudos colocam as taxas de conclusão do MOOC entre os 3 e 5%, com base em Coffrin et al. (2014), ou em US 7,7%, de acordo com o relatório de Chuang & Ho (2016). No entanto, deve ter-se em conta que as taxas de conclusão, ou seja, a conclusão de todas as atividades de avaliação que permitem aos participantes obter um certificado, não são um bom indicador do sucesso de um MOOC. Os participantes inscrevem-se nestes cursos com objetivos muito diversificados e, na maioria das

vezes, esses objetivos não incluem a conclusão de todo o curso. Em vez disso, há participantes que se preocupam em aprender apenas os conteúdos que consideram como relevantes e interessantes (Hadi & Gagen, 2016). Pretendemos abordar esta questão no presente trabalho, analisando o comportamento dos participantes num MOOC específico produzido e editado no Técnico Lisboa (IST), a maior escola portuguesa de Arquitectura, Engenharia, Ciência e Tecnologia, integrada na Universidade de Lisboa.

Os MOOCs do IST são cursos *on-line* abertos concebidos para oferecer principalmente uma educação nas áreas da Ciência, Tecnologia, Engenharia, Arquitectura e Matemática (STEAM) a qualquer pessoa, em qualquer parte do mundo, com as quatro características mencionadas anteriormente. Estes são cursos abertos gratuitos que exigem apenas o registo numa plataforma proprietária MOOC Técnico com base no Open edX e que dão acesso a uma educação certificada de alta qualidade. Os tópicos dos MOOCs visam diferentes grupos alvo: (i) cursos de ligação em ciências básicas de engenharia e tecnologia; (ii) cursos de pós-graduação sobre tópicos de unidades curriculares do 1º e 2º ciclos do ensino superior baseados nos cursos presenciais do IST; e (iii) cursos extracurriculares sobre temas transversais das áreas da STEAM. Os primeiros cursos *on-line* foram lançados até o final de outubro de 2016 e, num período de dois anos, mais dez cursos *on-line* foram lançados e vários deles resultaram em novas edições com sucesso. Cerca de 7.000 participantes estão atualmente matriculados nos cursos *on-line* do MOOC Técnico, que atingem uma taxa média de conclusão de 32%, e a equipa pedagógico-científica publica regularmente estudos sobre diferentes aspectos pedagógicos e resultados relativos à implementação de cursos MOOC Técnico com estratégias de aula invertida (Moura Santos & Viana, 2016; Viana & Moura Santos, 2018; Moura Santos & Ribeiro, 2017).

O presente MOOC em análise, para além de ser um curso de transição, pertence a uma classe especial: envolve a utilização de um Massive Open Online Laboratory – e-lab remote control laboratory – que constitui uma parte muito relevante do curso (ver também Viana & Moura Santos, 2018), tanto em relação ao conteúdo quanto à avaliação. Essa ligação entre o MOOC e o MOOL torna este curso especialmente interessante, aprimorando a experiência do aluno e mostrando a próxima relação entre a teoria e os dados experimentais.

Neste artigo, é feita uma análise minuciosa do MOOC “Física Experimental: Eletromagnetismo”, com base em estatísticas recolhidas a partir do relatório de classificação final, gerado pela plataforma do MOOC Técnico. A discussão concentrar-se-á principalmente nas taxas de abandono e conclusão e nas possíveis causas de abandono, considerando os efeitos das avaliações, atividades de revisão por pares e secções experimentais *hands-on* e remotas. Uma compreensão mais profunda das estatísticas e causas do abandono,

combinada com a compreensão de como certos tipos de atividades afetam os participantes, possibilitará mudanças futuras na estrutura do curso e no seu conteúdo, contribuindo para melhorar a experiência de aprendizagem dos participantes.

ESTRATÉGIAS DE APRENDIZAGEM DO MOOC

O MOOC em estudo, “Física Experimental: Eletromagnetismo” (Física Experimental..., 2018), é um curso totalmente gratuito, em português e com um esforço semanal estimado de 6h. Consiste numa introdução à física experimental na qual os participantes podem explorar técnicas de análise de dados, propagação de incertezas experimentais e métodos numéricos de ajuste de curvas para duas experiências distintas de eletromagnetismo: a primeira usando uma montagem efectuada com recurso a materiais simples e de fácil acesso e outra usando um laboratório remoto, o e-lab.

Este curso pretende desenvolver as habilidades de seus participantes no âmbito da análise de dados experimentais e ajudar a desenvolver critérios para aceitar um modelo teórico como adequado para descrever dados experimentais. No final do curso, os alunos devem ser capazes de usar algoritmos numéricos para ajustar curvas em folhas de cálculo, operar experiências remotas e construir montagens experimentais simples relacionadas com eletromagnetismo.

Este MOOC foi executado durante um período de 11 semanas, dividindo-se em cinco etapas relevantes:

- Preparação do curso: este primeiro passo consistiu numa etapa inicial de organização para o restante curso. Foi projetado como um período dado aos participantes para poderem reunir todos os materiais necessários para a experiência prática e instalarem o software necessário para operar o laboratório remoto e-lab;
- A essência – Incertezas nas medições diretas: introdução aos conceitos básicos usados no restante curso. Inclui a necessidade de ter uma incerteza associada a qualquer medida, diferenças entre os conceitos de precisão e exatidão, tipos de erros experimentais e várias métricas para quantificar os seus valores e distribuições. O conteúdo foi explicado por meio de vídeos e complementado com resumos em texto. Esta fase terminou com um questionário “Verdadeiro ou Falso”, contendo 29 frases a classificar;
- A essência – Incertezas em representações gráficas e ajustes lineares: discussão de tópicos mais avançados sobre incertezas, nomeadamente, a explicação de alguns detalhes e equações utilizadas para propagação de incertezas em medições indiretas, o conceito de número

significativo, a forma apropriada para expressar uma medição e as bases teóricas do método dos mínimos quadrados para regressão. Um exemplo prático de ajuste de curva usando funções simples de folha de cálculo também foi fornecido. Como antes, vídeos e textos foram usados para transmitir a mensagem e o capítulo terminou com uma avaliação constituída por cinco questões de múltipla escolha;

- **Experiência prática:** nesta etapa, os participantes foram convidados a seguir um vídeo com um tutorial passo a passo para construir uma experiência simples de eletromagnetismo utilizando apenas materiais básicos, como garrafas de plástico, fios, um potenciômetro, uma bússola e um amperímetro. Esta experiência teve como propósito a determinação da intensidade do campo magnético local da Terra. Para tal, gerou-se um campo magnético oposto ao da Terra usando duas bobinas percorridas por uma corrente regulada com recurso a um potenciômetro e o efeito desse campo pôde ser detectado com a bússola. Os participantes deviam medir a corrente nas bobinas, calcular o campo magnético imposto na bússola e assim determinar o campo magnético local da Terra. Em seguida, os participantes foram desafiados com uma questão aberta na qual deviam comparar o resultado obtido experimentalmente com o valor aceite pela comunidade científica e ainda fornecer sugestões para melhorar a precisão da experiência. A avaliação desta última questão foi feita por meio de revisão por pares efectuada pelos participantes;
- **Experiência remota:** a parte final deste MOOC envolveu a realização de uma experiência remota via e-lab e a subsequente análise dos dados recolhidos. A experiência consiste numa bobina rectangular cujo campo deve ser alinhado horizontalmente (eixo xx) e num carrinho que se move ao longo dessa direção medindo a intensidade do campo magnético em três eixos distintos para as várias posições consecutivas. Em primeiro lugar, foram efectuadas cinco questões que envolviam a realização de cálculos de modo a determinar os valores teóricos da intensidade do campo magnético para certas posições, direções e correntes de bobina. Depois disso, os participantes usaram o laboratório remoto e-lab para realmente medir a intensidade do campo para uma situação similar àquela calculada. Finalmente, os alunos foram desafiados a obter a característica do campo magnético ao longo do eixo xx para a região de campo próximo e, em seguida, ajustar uma função a esses dados usando ferramentas de folhas de cálculo.

Com esta estrutura, o presente MOOC pretendeu combinar as abordagens do xMOOC e do cMOOC usando uma forte componente baseada em vi-

de aulas que permite a explicação clara e organizada dos conceitos e métodos básicos necessários para concluir o curso, e uma componente conectiva baseada na revisão por pares da questão aberta, que permite o desenvolvimento do pensamento crítico e contribui para uma compreensão mais profunda do tema resultante da necessidade de refletir sobre as respostas dos outros participantes. A revisão por pares também contribui para a escalabilidade e a autonomia do curso, evitando a necessidade de correção manual de todas as respostas pela equipa de instrutores. A componente experimental deste MOOC torna-o especialmente adequado para a aplicação de métodos de pedagogia conectiva: os alunos foram encorajados a discutir resultados e fazer perguntas usando o fórum do MOOC, que foi moderado pelos instrutores. Os participantes capazes de concluir o curso com uma classificação acima de 60% receberam um Certificado de Participação.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O presente MOOC teve uma participação de 143 participantes, o que é consideravelmente superior ao ano anterior, o qual contou com 105 participantes (Física Experimental..., 2017). O aumento do número de alunos resulta de manobras de marketing que contribuíram para tornar os cursos Técnico MOOC mais amplamente conhecidos; também mostra que as pessoas têm interesse no conceito MOOC e querem fazer parte dos cursos quando essa possibilidade surge.

Um estudo sobre as características dos participantes deste MOOC foi realizado. A distribuição de género dos participantes é muito equilibrada, contando com mais de 40% de participantes do sexo feminino.

Sobre a relação entre os participantes do MOOC e o Instituto Superior Técnico (IST), a grande maioria das pessoas inscritas no presente MOOC não faz parte da comunidade IST. Isto mostra que o programa MOOC Técnico conseguiu atingir uma quantidade considerável de pessoas fora de sua esfera de influência imediata.

No que diz respeito à comunidade do IST, foi possível determinar a distribuição e os papéis dos participantes dentro desta comunidade. A Figura 1 mostra que o presente MOOC foi capaz de atingir uma população muito diversificada, incluindo estudantes de nove cursos diferentes e vários membros do *staff* do IST. Esta diversidade mostra que mesmo os alunos que concluíram várias unidades curriculares relacionadas com física ao longo do seu percurso académico sentem que seus conhecimentos sobre física experimental são insuficientes e, portanto, querem aprender mais sobre esse tópico.

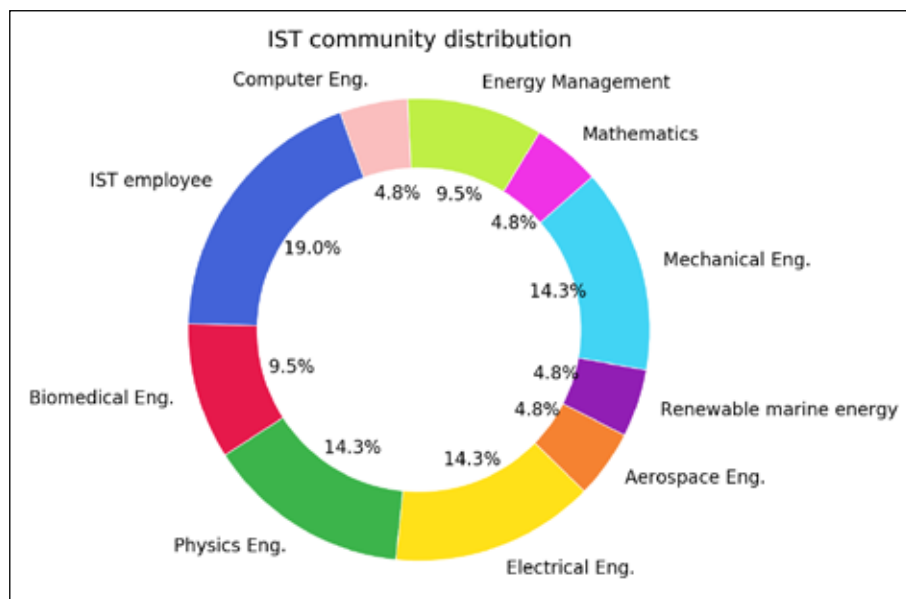


FIGURA 1. Papel dos participantes na comunidade IST, mostrando uma diversificada distribuição.

A variação do número de participantes activos e sua avaliação também foi estudada. Como referido anteriormente, uma das maiores preocupações relacionada com os cursos MOOC são as altas taxas de abandono. No presente MOOC, estas preocupações foram verificadas e na Figura 2 é possível ver o número de participantes activos para os diferentes estágios de avaliação. A análise destes dados mostra que vários participantes se inscreveram no curso já após o seu início, o que explica o aumento de participantes do exercício 1 para o exercício 2. Também é relevante dizer que, mesmo para a primeira avaliação, o número de participantes que efetivamente participou activamente o curso, cerca de 50, compõe apenas 35% do total de alunos matriculados.

A partir da Figura 2, pode-se ainda perceber que, à medida que as atividades começaram a requerer mais esforço, exigindo materiais para a experiência prática ou a instalação de software para a experiência remota, uma quantidade considerável de participantes abandonou o curso. No entanto, após essa diminuição da assiduidade ocorrida entre o exercício 2 e o início da experiência prática, o número de participantes activos permaneceu aproximadamente constante, mostrando que cerca de quinze participantes tinham intenções de concluir o curso.

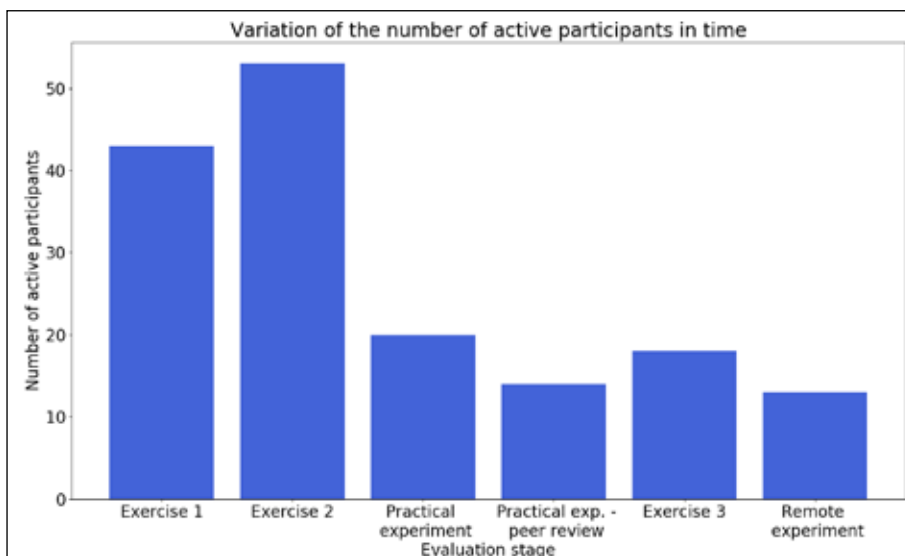


FIGURA 2. Número de participantes ativos ao longo das várias etapas de avaliação. Após uma queda inicial, o número de participantes permanece aproximadamente constante até o final do curso.

Dado que o presente MOOC inclui uma componente conectivista, constituída principalmente pela revisão por pares da discussão da experiência prática, é interessante notar que esta etapa da avaliação causou apenas uma pequena diminuição no número de participantes activos. Apesar de exigir mais trabalho e uma reflexão mais profunda sobre o tema, a grande maioria dos alunos participou, mostrando a sua disponibilidade para avaliar o trabalho de outros participantes e aprender com essa experiência.

Em relação à avaliação, a distribuição das notas está explicitada na Figura 3. A partir destes dados, fica claro que, à medida que o curso avança, as notas melhoram; este fenómeno resulta do abandono do curso pelos alunos menos motivados, os demais participantes que demonstram mais interesse e motivação permanecem e conseguem alcançar notas mais altas.

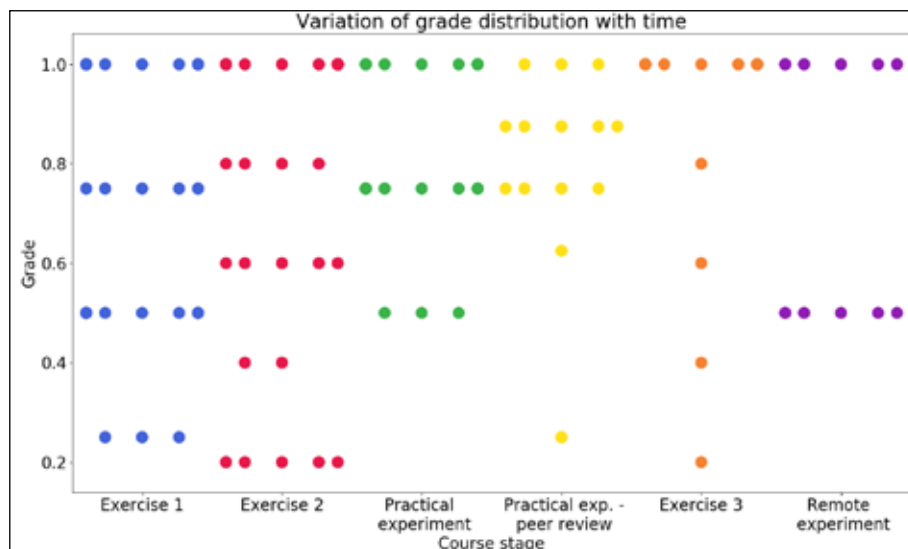


FIGURA 3. Representação detalhada da distribuição de notas para as diferentes avaliações. À medida que as etapas mais avançadas do curso são atingidas, a quantidade de participantes com notas mais baixas tende a diminuir.

Após o término do curso, uma nota final baseada numa média ponderada sobre as várias avaliações já discutidas é dada a cada aluno. Como esperado, há uma grande fração de alunos com classificações abaixo dos 20%, o que é uma consequência da alta taxa de abandono.

No entanto, se a análise da nota final for focada nos alunos que de facto se comprometeram ao longo do curso, a distribuição nota final torna-se muito diferente. A Figura 4 mostra essa distribuição incluindo apenas alunos que participaram pelo menos em quatro avaliações. Este gráfico mostra um panorama bastante diferente, indicando que os alunos que participaram ativamente no MOOC obtiveram boas avaliações, refletindo sucesso na aprendizagem dos tópicos propostos.

Como dito anteriormente, os participantes que conseguiram atingir uma nota final acima de 60% receberam um certificado. Estes compõem 10,1% de todos os alunos matriculados no curso.

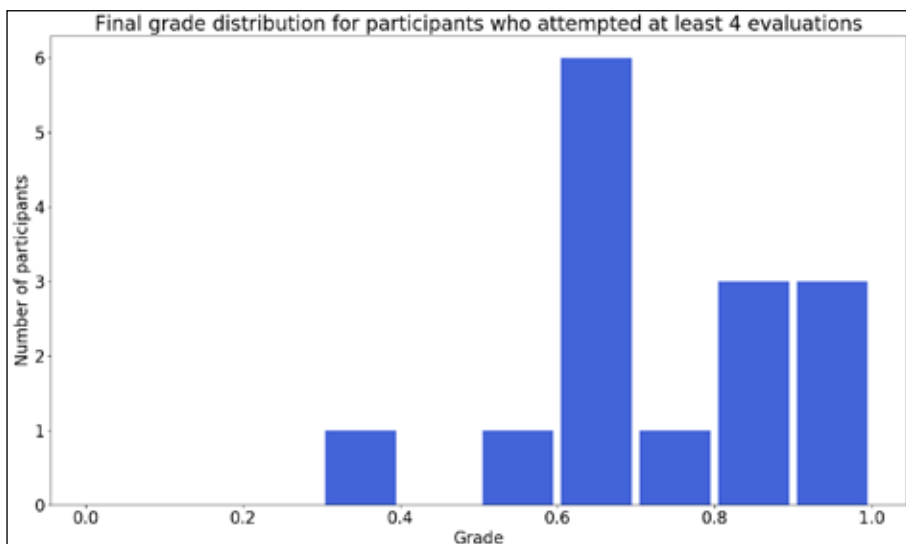


FIGURA 4. Distribuição da nota final para alunos que participaram em pelo menos quatro das avaliações. Este grupo mostra resultados muito melhores, que são provavelmente o resultado de um maior nível de motivação para o curso.

CONCLUSÕES

Resumindo, o presente curso MOOC teve um número historicamente alto de participantes que, mesmo com uma alta taxa de abandono, resultou num grande número de alunos a concluir o curso e obter o respectivo certificado. É importante dizer que a maioria destes participantes não faz parte da comunidade do IST, o que revela a alargada esfera de influência do programa MOOC Técnico. Além disso, dentro da comunidade do IST, estudantes de vários cursos decidiram participar neste MOOC, indicando a existência de interesse pelo tópico, mesmo para alunos já com conhecimentos de física. Em relação ao número de participantes, é possível concluir que uma parcela considerável dos participantes inscritos nunca participou em nenhuma das avaliações propostas e outros os abandonaram quando as tarefas se tornaram mais complexas. No entanto, os alunos que se comprometeram com o curso foram capazes de completá-lo com boas avaliações. Por fim, fica também claro que os alunos estão abertos a uma abordagem mais conectivista, abraçando as tarefas de cooperação e revisão por pares.

REFERÊNCIAS

Chuang, I., & Ho, D. D. (2016). HarvardX e MITx: quatro anos de cursos on-line abertos - outono de 2012 a verão de 2016. Disponível no SSRN: <https://ssrn.com/abstract=2889436> ou <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.2889436>.

Coffrin, C., Corrin, L., de Barba, P., & Kennedy, G. (2014). Visualizando padrões de envolvimento do aluno e desempenho em MOOCs. *Proceedings da Quarta Conferência Internacional sobre Aprendizagem Analytics e Conhecimento*. LAK '14. Nova York, NY, EUA: ACM: 83-92. doi: 10.1145 / 2567574.2567586. ISBN 9781450326643.

Física Experimental: Eletromagnetismo MOOC. URL: <https://courses.mooc.tecnico.ulisboa.pt/courses/course-v1:IST+feX\Mag3D+2017/about/>

Física Experimental: Eletromagnetismo MOOC. URL: <https://courses.mooc.tecnico.ulisboa.pt/courses/course-v1:IST+feX\Mag3D+2018/about/>

Hadi, S. M., & Gagen, P. (2016). Novo modelo para medir as taxas de conclusão dos MOOCs. In *Conferências da 4ª Cúpula Europeia do MOOC* (EMOOCs 2016). Graz, Áustria.

Moura Santos, A., & Viana, J. (2016). Do Design à produção: Primeiro Curso Experiências no MOOC Técnico. In *Procedimentos ICERI2016. 9ª Conferência Internacional Anual de Educação, Pesquisa e Inovação*. Sevilha, Espanha. ISBN: 978-84-617- 5895-1. doi: 10.21125 / iceri.2016.1031.

Moura Santos, A., & Ribeiro, P. (2017). Avaliação em um curso de matemática online. In *EMOOCs-WIP 2017*. Documentos de Trabalho em Andamento da Experiência e Pistas de Pesquisa e Documentos de Posição do Policy Track na EMOOCs 2017. Madrid, Espanha.

O FutureLearn oferece o maior MOOC já que mais de 440.000 alunos se reúnem para aprender inglês. *Aprenda Futuro*. Recuperado em 25 fev. 2016.

Parr, C. (2013). Os criadores de MOOC criticam a falta de criatividade dos cursos. *Tempos de Ensino Superior*. Recuperado em 1 jun. 2015.

Taxas de conclusão do MOOC. <https://www.katyjordan.com>. Retirado em 28 abr. 2017.

Viana, J., & Moura Santos, A. (2018). Alunos do MOOC: quem são eles e quais são as suas perspectivas? In *Procedimentos INTED2018. 12ª Conferência Internacional de Tecnologia, Educação e Desenvolvimento*. Valência, Espanha. ISBN: 978-84-697-9480-7. doi: 10.21125 / inted.2018.1382.

SISTEMA DE CONCEITOS FÍSICOS RELACIONADOS COM O CONCEITO DE MOVIMENTO MECÂNICO

THE SYSTEM OF CONCEPTS OF PHYSICS RELATED TO THE CONCEPT OF MOVEMENT OF MECHANICS

Jorge Maria Gonçalves Mayer¹

RESUMO

A investigação aborda a problemática relacionada com insuficiências que alguns estudantes do 1º ano do curso de Licenciatura no Ensino da Física do ISCED-Huíla apresentaram em relação ao processo de ensino aprendizagem dos conceitos físicos relativos aos conteúdos de Mecânica Clássica (Mecânica Newtoniana). Apresenta um modelo de um sistema de conceitos físicos relacionados ao movimento mecânico, que estabelece relações dialécticas entre subsistemas que expressam a essência do objeto físico estudado. A concepção sistémica alcança a sua maior transcendência quando a interpretação dos vínculos conceituais permite chegar a generalizações filosóficas em estreita relação com o desenvolvimento axiológico necessário. A estrutura do sistema de conceitos físicos inerentes ao conceito de movimento mecânico revela a ideia fundamental da teoria da Mecânica Clássica e entre os modelos fundamentais que se estudam figuram os que expressam entes físicos cujos movimentos se caracterizam e se explicam mediante o sistema de conceitos físicos e os que expressam propriamente o conceito de movimento mecânico. O modelo caracterizado pelos subsistemas de conceitos físicos revela relações funcionais básicas entre os componentes (subsistemas) descritivo ou cinemático, dinâmico e energético, de forma que, tendo em conta as dimensões cinemática, dinâmica e energética, é possível alcançar precisões que contribuem potencialmente para o aprofundamento destes conceitos físicos. Pela aplicação desse modelo, alcança-se melhor compreensão pelos estudantes, professores e não só de uma Mecânica Clássica intimamente ligada à diferenciação e integração dos conhecimentos, como a concretização do método dialéctico. Esta investigação contribuiu para a formação epistemológica dos estudantes e dos professores.

Palavras-chave: Movimento mecânico, Sistema de conceitos físicos, Mecânica Clássica, Método dialéctico.

EXTENDED ABSTRACT

This investigation approaches the problematic related to insufficiencies presented by some first year graduate students majoring at Physics course at ISCED-Huíla related to concepts of physics such as mechanics of movement acquired in teaching and learning process in terms of Classic Mechanics (Newtonian mechanics). It presents a model of systemic nature; a system of

¹ Instituto Superior de Ciências de Educação – ISCED-Huíla, Angola, jorgemgmayer@gmail.com

concepts of physics related to mechanics of movement which establish the systemic structure that express the dialectic relationships the concepts of physics subsystems which express the essence of the singular subject of Physics. The systemic notion reaches its main transcendence when the interpretation of conceptual relationship permits to reach philosophical generalizations in a narrow relationship with the necessary axiologic development. The system of the concept of physics structure inherent to mechanics of movement reveals the fundamental idea of Classic Mechanics and between the fundamental models under the study; they represent those that express physical creatures whose movements are characterized and explained through the physical concept system as well as those expressing the mechanics of movement as such. The model characterized by physical concepts subsystems reveals three basic functional relationships among the components (subsystems) which permit to deepen the mechanics of movement concept according to the study contributions, either descriptive or kinematics, dynamic and energetic, taking into account the dimensions such as: kinematics, dynamic and energetic; they permit to reach precisions which contributes potentially in deepening the concepts of physics. The application of this model, not only students, teachers as well as other expert in the field can reach a better understanding from the Classic Mechanics which is closely related to differentiation and integration of the knowledge as a fulfilment of dialectic method. This investigation can provide a great contribution to students and teachers epistemological training.

Key-words: Mechanics of Movement; System of concept of Physics, Classic Mechanics, Dialectic Method.

INTRODUÇÃO

Na disciplina de Mecânica Clássica (Mecânica Vectorial, Mecânica Newtoniana) do 1º ano do curso de Licenciatura no Ensino da Física do ISCED-Huíla, o sistema de conceitos físicos relacionados com o conceito de movimento mecânico é a base para que o estudante compreenda melhor estes conceitos relacionados com outras formas de movimento físico.

No estudo realizado nesta investigação, mediante a análise do programa da disciplina de Mecânica Clássica (Mecânica Vectorial, Mecânica Newtoniana), a revisão do tratamento metodológico aos conceitos nos planos de aula e as observações de aulas aos estudantes do terceiro e quarto anos, durante o desenvolvimento da prática profissional (prática pedagógica), foram realizadas entrevistas com alguns professores de Física do ISCED-Huíla que leccionaram esta disciplina e outros professores de Física do Ensino Secundário.

Tendo em consideração os resultados deste estudo e das investigações realizadas pelo autor durante o seu doutoramento, assim como os resultados

das equipas de pesquisa do Instituto Nacional de Investigação e Desenvolvimento da Educação (INIDE) e do ISCED-Huíla, onde o autor também fez parte, constatou-se de facto algumas insuficiências no processo de ensino-aprendizagem (PEA) dos conceitos físicos relacionados com o conceito de movimento mecânico, vinculadas principalmente com:

- Limitações apresentadas pelos estudantes ao explicar um facto ou fenómeno fazendo uso dos conceitos físicos relacionados com o conceito de movimento mecânico, evidenciando uma aprendizagem memorística das definições destes, pois estes conceitos eram tratados de forma isolada;
- Insuficiências na realização de algumas tarefas, em particular naquelas requeridas para a resolução de exercícios e/ou problemas práticos relacionados com o conceito de movimento mecânico, manifestando limitações no domínio dos conceitos envolvidos;
- Desconhecimento, por parte dos estudantes, que o conceito de movimento pode ser estudado tendo em conta um sistema de conceitos físicos, pois os conceitos físicos eram tratados de forma isolada.

Em função destas insuficiências, o autor desta investigação organizou didacticamente um sistema e um modelo de carácter sistémico de conceitos físicos relacionados com o movimento mecânico cuja estrutura sistémica encerra relações dialécticas entre subsistemas de conceitos físicos que expressam a essência do que se estuda na Mecânica Clássica.

DESENVOLVIMENTO

O conhecimento é um estado de mutação de compreensão que emerge no sujeito cognoscente num desenvolvimento de uma sucessão de processos lógicos de indução-dedução, análise-síntese, abstracção-concretização, acerca do conteúdo de distintas informações sobre um facto ou fenómeno, problema ou processo. Estes processos mentais são realizados pelo sujeito sobre a base dos marcos interpretativos que possui, aqueles que, por sua vez, podem ser transformados no processo de apropriação de novos conhecimentos.

No processo de ensino-aprendizagem (PEA) do sistema de conceitos físicos relacionados com o conceito de movimento mecânico, o estudante, para obter um conhecimento, tem que reinterpretar e reconfigurar a nova informação ministrada pelo professor acerca do facto ou fenómeno que como objecto de estudo medeia na interacção didáctica. Esta informação pretende compartilhar o conhecimento e a convicção da sua veracidade que possui o professor, isto é, a compreensão e a explicação obtidas pelo sujeito que as transmite, por sua vez, dos seus próprios marcos interpretativos.

Este intercâmbio de informação pode converter-se numa interacção didáctica se se produzir uma reestruturação da subjectividade do estudante no marco das suas possibilidades cognitivas e afectivas. A interacção didáctica é efectiva se os estudantes activam os seus processos mentais e as suas histórias de vida, se configuram a sua actuação cognoscitiva com um alto grau de motivação e revalorizam o seu estado cognitivo desde os seus próprios marcos de interesses socioculturais e estados emocionais, estados esses que caracterizam a inserção coerente da informação obtida com significatividade cognitivo-afectiva, na situação de desenvolvimento em que se encontram.

Essa interacção didáctica é contextual e transforma a atitude do estudante sem limitar-se à mudança quantitativo-qualitativa da informação que ele possui e dispõe acerca do objecto de estudo, porque estar informado não significa estar a compreender, evidenciando impacto no crescimento da sua capacidade de decisões e possibilidade de realizar diferentes acções depois que compreenda o facto ou fenómeno que antes não entendia.

Para que a aprendizagem esteja encaminhada no sentido do desenvolvimento intelectual dos estudantes, a tarefa dos professores é de dirigir o processo de ensino-aprendizagem da disciplina no geral e, em particular, de Mecânica Newtoniana, de tal forma que permita aos estudantes dar um salto de qualidade no seu plano intelectual, converter os seus conhecimentos, as suas habilidades e os seus hábitos adquiridos num instrumento para compreender e actuar na busca de novos conhecimentos. A estrutura sistémica de aprendizagem requer que a lógica sistémica do conteúdo se conjugue com a realização de um sistema de tarefas.

Para um aprofundamento no Processo de Ensino Aprendizado conceitual, é indispensável precisar alguns elementos de partida:

- O pensamento desenvolve-se conforme a transição do concreto ao abstracto e deste ao concreto pensado. Tudo isto como um processo dialéctico no qual são inerentes às relações entre a análise e a síntese, a essência e o fenómeno, o quantitativo e o qualitativo, entre outros pares categoriais (Kopnin, 1983, citado por Mayer, 2015);
- O conceito constitui o reflexo subjectivo das características mais gerais e essenciais que definem os objectos cognitivos;
- Nas ciências básicas, emprega-se uma classificação dos conceitos em qualitativos, quantitativos e comparativos (ACURSS, 1983, citado por Mayer, 2015);
- A conceitualização das propriedades dos objectos, mediante os conceitos qualitativos e quantitativos, que requerem de uma abordagem do vínculo entre conceitos como reconstrução pensada do objeto, objecto que, sobre a base da dita reconstrução, pode ser definido ou redefinido mediante a revelação da sua essência;

- A partir da valorização de diferentes concepções sobre sistema, assume-se o mesmo desde a posição de que “... não é somente um conjunto de componentes e propriedades cujas relações e interações engendram numa nova qualidade integradora, senão também o carácter funcional ou a funcionalidade e a interfuncionalidade entre os componentes integrantes”.

Várias investigações sobre conceitos destacam-se nas metodologias das ciências em geral, e em particular da Física (Mayer, 2015; Mayer, 2012a; Costa, 2012; Martínez Álvarez, 2011; Roa, 2008, entre outros), que fazem abordagens sobre os conceitos físicos onde explicam a função tanto do professor como do estudante no PEA.

Mayer (2015), citando Kuznetova (1985), enfatiza que a elevação da funcionalidade do pensamento criador é a direcção fundamental do aperfeiçoamento da formação conceitual e que a Ciência e a prática do PEA, nesta ordem, têm demonstrado que a assimilação sistemática e racional dos conceitos por etapas é exitosa. Destaca também a importância do emprego do enfoque sistémico na organização científica do quotidiano laboral dos professores e estudantes como um elemento fundamental na determinação das invariantes dos conhecimentos para propiciar a funcionalidade dos conhecimentos conceituais.

Um sistema de conceitos é um conjunto hierárquico de conceitos entrelaçados geneticamente, conhecimentos reflectidos nos sinais, que dão as características gerais e as relações das classes de objectos, a sua inter-relação em contradição dialéctica e o seu desenvolvimento (Mayer, 2015, citando Concepción, 1989).

Segundo várias teorias, os modelos constituem uma representação abstracta do objecto de estudo, podendo-se inferir uma relação de identidade entre o modelo e o sistema conceitual, de forma que os conceitos no marco da teoria caracterizam, directamente, o modelo ou objecto mediatizado. Entretanto, existem teorias físicas nas quais um modelo representa um ente físico cujos movimento e desenvolvimento se caracterizam e se identificam com um sistema conceitual que se estabelece. Trata-se de uma modelação sustentada na relação de semelhança – dimensões associadas a uma abstracção ditada pela lógica do desenvolvimento da Ciência.

No entanto, a lógica do desenvolvimento da Ciência corresponde-se com a do desenvolvimento das ideias científicas, existindo uma estreita relação entre as ideias e o desenvolvimento conceitual. Donatién e González (2012) enfatizam que o lugar das ideias no desenvolvimento das teorias pode ser pontualizado, que o pensamento se identifica com uma ideia; no entanto, toda forma de pensamento contém um ideia, que culmina com o seu desenvolvimento.

Assim, elaborou-se uma estrutura de um sistema de conceitos físicos relacionados com o conceito de movimento mecânico, seguindo uma metodologia própria do investigador deste trabalho, que se segue (Mayer, 2015):

1. Precisar as ideias e modelos fundamentais da Mecânica Clássica no programa;
2. Listar os conceitos físicos relacionados com o movimento mecânico no sistema de conhecimentos do programa de Mecânica;
3. Determinar as funções de cada conceito físico na compreensão da essência do conceito de movimento mecânico;
4. Agrupar os conceitos físicos, de acordo com o critério didáctico concebido no programa, em componentes e subsistemas funcionais;
5. Estabelecer relações de interdependência e hierarquia entre os subsistemas de conceitos físicos;
6. Determinar as propriedades inerentes à integração do sistema.

De acordo com a Figura 1 a seguir, a estrutura de um sistema de conceitos físicos inerentes ao estudo do conceito de movimento mecânico para a Mecânica Vectorial, do 1º Ano do Curso de Licenciatura no Ensino da Física do ISCED-Huíla, elaborada pelo autor desta investigação, revela a ideia fundamental da teoria que sustenta o carácter absoluto do espaço-tempo que alcança o seu maior nível de desenvolvimento no princípio de acção a distância. Entre os modelos fundamentais que se estudam, também figuram os que expressam entes físicos cujos movimentos se caracterizam e se explicam mediante um sistema de conceitos físicos e os que expressam propriamente o conceito de movimento mecânico.

É contributo do autor desta investigação que a análise e a classificação dos conceitos físicos relacionados com o conceito de movimento mecânico podem caracterizar-se, de modo parcial, a partir de cinco aspectos sucedidos em componentes do sistema conceitual relacionado com o conceito de movimento mecânico:

1. Conceitos físicos que expressam a forma do movimento;
2. Conceitos físicos que expressam as relações espaço-tempo;
3. Conceitos físicos que expressam as propriedades mecânicas dos corpos;
4. Conceitos físicos que expressam as interacções entre os corpos;
5. Conceitos físicos que expressam o comportamento energético do sistema mecânico.

A relação entre os elementos componentes (subsistemas) determina a estrutura do sistema de conceitos físicos relacionados com o conceito de movimento mecânico e permite revelar níveis de profundidade cada vez maiores. A organização estrutural dada pelas relações intercomponentes determina o sistema de conceitos físicos relacionados com o conceito de movimento mecânico e permite penetrar na sua essência filosófica, como uma contribuição à

concepção científica do mundo que o PEA da Física exige da personalidade dos estudantes.

Deste modo, o enfoque sistémico possibilita a análise do conteúdo e da estrutura do sistema de conceitos físicos e a concepção sistémica do modelo alcança a sua maior transcendência quando a interpretação dos vínculos conceituais permite chegar a generalizações filosóficas em estreita relação com o desenvolvimento axiológico necessário.

As contribuições à concepção científica do mundo, desde o auxílio da teoria mecânica ao primeiro quadro físico, são portadoras de limitações do pensamento teórico associadas a uma interpretação mecanicista da realidade que restringe a matéria à substância. Portanto, torna-se necessário, por meio do PEA dos conceitos físicos da Mecânica Clássica, tratar-se a verdade histórica ao considerar a acção a distância e precisar-se a limitação ontológica associada a uma visão parcial da materialidade do sistema.

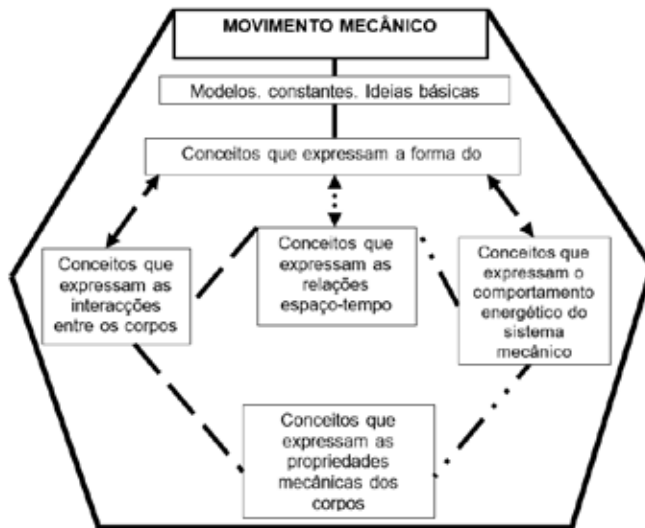


FIGURA 1. Estrutura do sistema conceitual que caracteriza o estudo do movimento mecânico (Mayer, 2015).

As ideias e os modelos, desde a fundamentação realizada, resultam nos elementos teóricos de partida para a compreensão de todo o sistema conceitual.

A ideia básica da Mecânica Clássica radica no carácter absoluto do espaço-tempo, elemento gnoseológico que, ao concretizar-se através de todo o sistema de elementos da teoria, circunscreve os marcos desta última para condicionar uma concepção paradigmática de interpretação dos fenómenos inerentes ao quadro mecânico do mundo.

O modelo fundamental da Mecânica Clássica é o denominado “ponto material” ou “partícula”, que, ao permitir o estudo do movimento mecânico mais simples, se estabelece sobre a base da semelhança da imagem de um corpo que se coloca a uma distância do observador muito maior que as suas dimensões, como um ponto geométrico. É evidente que, associado a este modelo, o denominado “corpo” possui um carácter primário; no entanto, ao desprezar-se a natureza da sua composição, constitui um primeiro nível de abstracção dos entes que experimentam movimento mecânico. O modelo fundamental está contido em modelos relacionados com movimentos mecânicos mais complexos, tais como: corpo rígido, sistema corpo-mola, pêndulo simples ou pêndulo matemático.

Os conceitos que expressam formas concretas do movimento mecânico ou fenómenos particulares da sua manifestação estão estreitamente relacionados com os modelos antes mencionados. Entre eles, na mesma ordem em que se mencionam os modelos, figuram: movimento de translação (rectilíneo e no plano), movimento de rotação, movimento oscilatório livre. Também, em certa medida relacionados com os anteriores, estão o movimento oscilatório amortecido, o movimento oscilatório forçado e a ressonância mecânica.

Os conceitos que expressam as relações espaço-tempo estão relacionados com o método cinemático do estudo dos fenómenos, que está conformado pelos conceitos primários de posição, tempo, e a sua concretização em situações particulares mediante os conceitos de frequência linear, período, frequência angular, elongação, amplitude. E também pelos conceitos que expressam as relações intracomponentes, tais como: sistema de referência, sistema de referência inercial, trajectória, deslocamento linear, deslocamento angular, velocidade linear, velocidade angular, aceleração linear, aceleração angular. Deste modo, caracteriza-se a dimensão cinemática, conformada pelas relações conceituais entre os conceitos que expressam a forma do movimento e os conceitos que expressam as relações espaço-tempo (Figura 2), relações que permitem compreender cinematicamente o movimento mecânico em estreita relação com a sua classificação, possibilitando, assim, definir o conceito de movimento mecânico sustentado nos conceitos de corpo e de sistema de referência.

Os conceitos que expressam as propriedades mecânicas dos corpos, por sua vez, permitem compreender as diferenças dos estados mecânicos de um ou outro corpo e de um ou de outro sistema ante condições similares. Entre eles, temos os conceitos de inércia, massa inercial e massa gravitacional. E, desde a relação destes últimos com os conceitos que expressam as relações espaço-tempo, se formam os conceitos de centro de massa, momento de inércia e de momento linear (quantidade de movimento), assim como os conceitos que expressam as relações intercomponentes, que, mediante uma segunda sistematização com alguns daqueles, permitem alcançar – como no caso do mo-

mento angular (quantidade de movimento angular) – conceitos que expressam as relações intercomponentes de segundo nível de sistematização.

As relações intercomponentes inerentes a este último grupo conceitual resultam em elementos da dimensão dinâmica. Num primeiro nível do grupo de conceitos que expressam as interações entre os corpos nessa dimensão estão: força, força central, força de inércia, peso, que, ao se relacionarem com os conceitos de carácter espaço-tempo, implicam os conceitos de impulso da força, torque (momento da força), braço da força, coeficiente de atrito estático, coeficiente de atrito dinâmico, coeficiente de amortecimento, coeficiente de restituição.

A dimensão dinâmica do sistema conceitual está conformada pelas relações entre conceitos que expressam as relações espaço-tempo, os que expressam as propriedades mecânicas e os que expressam as interações entre corpos. Esta dimensão permite compreender, explicar e prever fenómenos tipificados como formas e que são denominados “tipos de movimentos”, sobre a base das denominadas leis de Newton. Neste nível de sistematização, a lei de conservação da quantidade de movimento (momento linear), como sistematização das leis referidas anteriormente, expressam um nível superior de estudo do objecto da Mecânica Clássica ante condições concretas. O nível de essência que se revela nesta dimensão permite abordar a particularidade do movimento mecânico na qual a quantidade de movimento do sistema objecto de estudo se conserva sempre que tanto as forças internas resultantes como as externas estejam compensadas.

Finalmente, no grupo de conceitos que expressam o comportamento energético do sistema mecânico encontram-se os conceitos de trabalho, energia, energia cinética, energia potencial, todos formados mediante a sistematização de conceitos inerentes aos grupos já explicados.

A dimensão energética do sistema conceitual está conformada a partir das relações entre os conceitos que expressam as relações espaço-tempo, os conceitos que expressam as propriedades mecânicas e os conceitos que expressam o comportamento energético, podendo ser mencionadas, neste sentido, a potência e força conservativa. A lei da conservação e da transformação da energia mecânica expressa um nível superior de sistematização dos conceitos deste grupo, de modo que, atendendo-se ao aspecto energético, é factível aprofundar essa percepção, tanto no caso particular de movimento mecânico, no qual a energia do sistema se conserva, pois, o sistema está submetido somente à acção de uma força externa conservativa, como também, no caso contrário, que implica uma visão mais geral do processo de conservação e de transformação da energia.

No sistema de conceitos físicos apresentado na Figura 1, revelam-se três relações funcionais básicas entre os subsistemas que permitem aprofundar, conforme a Figura 2, o conceito de movimento mecânico mediante as

contribuições ao estudo sejam pelo aspecto descritivo (ou cinemático), dinâmico ou energético.

Na dimensão dinâmica estuda-se o movimento mecânico, perante situações alternativas que se sustentam nas interacções entre corpos, e na dimensão energética o comportamento energético, possibilitando a compreensão e explicação das relações essenciais do movimento. Trata-se não de características externas arbitrárias do movimento dos corpos e sistemas, senão de propriedades inerentes à natureza do móvel que se manifesta por meio da interacção ou do comportamento energético do sistema.



FIGURA 2. Dimensões do movimento mecânico (Mayer, 2015).

Nesta classificação de conceitos físicos relacionados com o conceito de movimento mecânico sintetizam-se os princípios fundamentais da Física: princípio da relatividade, princípio da superposição, princípio da acção mínima e princípio da conservação e da transformação da energia.

Um nível integrador das relações conceptuais expressadas nos cinco subsistemas de conceitos físicos anteriores revela-se na conceitualização do movimento mecânico, no contexto da sistematização da teoria da Mecânica Clássica, de forma que se evidencia que o núcleo da teoria física está constituído pelos modelos e constantes físicas, as ideias básicas e as suas leis.

O sistema de conceitos físicos relacionados com o conceito de movimento mecânico abordado tem uma relação directa com o princípio fundamental da teoria mecânica de Newton e um vínculo com uma outra teoria fundamental do primeiro quadro físico do mundo, a teoria da gravitação de Newton, que permite uma compreensão mecânica integral dos fenómenos do megamundo e do macromundo, com a aplicação dos métodos dinâmico e energético, que é também uma diferenciação do objecto da Mecânica.

Com esta abordagem, contribuiu-se para a formação epistemológica dos estudantes e professores e alcançou-se uma melhor compreensão pelos estudantes e professores não só de uma Mecânica Clássica, que está intimamente ligada à diferenciação e integração dos conhecimentos, como também da concretização do método dialéctico.

CONCLUSÕES

Os estudantes do 1º Ano do Curso de Licenciatura no Ensino da Física do ISCED-Huíla mostraram ter compreendido melhor o conceito de movimento mecânico ao lhes ser apresentado um sistema de conceitos físicos relacionados com o conceito de movimento mecânico.

O modelo do sistema de conceitos físicos relacionados com o conceito de movimento mecânico, caracterizado pelos subsistemas de conceitos físicos, revela três relações funcionais básicas entre os subsistemas que permitem aprofundar o conceito de movimento mecânico conforme as contribuições no estudo, descritivo ou cinemático, dinâmico e energético, ou seja, tendo em conta as dimensões cinemática, dinâmica e energética, permitiu alcançar precisões que contribuíram potencialmente no aprofundamento dos conceitos físicos relacionados com o conceito de movimento mecânico.

Esta investigação contribuiu para a formação epistemológica dos estudantes e dos professores.

REFERÊNCIAS

- André, A. (2012). La resolución de problemas de Física en la carrera de licenciatura en Educación opción Física. *Exposición de carteles en el VI Taller Iberoamericano de Enseñanza de la Física Universitaria*. La Habana, Cuba.
- Astolfi, J. (1998). El aprendizaje de conceptos científicos: Aspectos epistemológicos, cognitivos y lingüísticos. *Enseñanza de las Ciencias*, 6(2), 147-155.
- Donatién Caballero, J., González Márquez, V. (2012). La idea científica. Su contextualización a través del proceso de la Didáctica de la Física. En *Memorias del evento científico ENSFISMAT*. 2012. Universidad de Ciencias Pedagógicas Frank País García. Santiago de Cuba.
- Galagovsky, L. (1993). Redes conceptuales: bases teóricas e implicaciones para el proceso de enseñanza-aprendizaje de las ciencias. *Enseñanza de las Ciencias*, 11(3), 301-307.
- INIDE. Instituto Nacional de Investigação e Desenvolvimento da Educação (INIDE) do Ministério da Educação de Angola (2010). *Projecto de Investigação para o melhoramento do Ensino da Física em Angola*.
- Kopnin, P. (1983). *Lógica Dialéctica*. Ciudad de La Habana, Cuba: Editorial Pueblo y Educación.
- Mayer, J. (2007). *Proposta metodológica para o desenho de sistema de tarefas para o Ensino-Aprendizagem da Física Elementar no Ensino de base desde um enfoque construtivista*. [Tese não publicada apresentada para a obtenção do grau científico de Mestre em Ensino das Ciências]. Universidade Agostinho Neto. Instituto Superior de Ciências da Educação. Lubango, Angola.

Mayer, J. (2012a). Enseñanza aprendizaje de los conceptos físicos de la mecánica clásica en la formación de profesores de Física en Angola. *Exposición de carteles en el VI Taller Iberoamericano de Enseñanza de la Física Universitaria*. La Habana, Cuba.

Mayer, J. (2012b). Procedimiento para el proceso de enseñanza aprendizaje de los conceptos físicos de la Mecánica Clásica. *Ponencia en Taller de Debate en el 8vo Congreso Internacional de Educación Superior "Universidad 2012"*. Palacio de Convenciones de la Habana, Cuba.

Mayer, J. (2015). *El Proceso de Enseñanza Aprendizaje del Sistema de Conceptos Físicos relacionados con el Movimiento Mecánico en la Formación de Profesores de Física en Angola*. [Tese não publicada apresentada para a obtenção do Grau Científico de Doutor em Ciências Pedagógicas, especialidade de Física]. Universidad de Holguín, Cuba.

Nzau, D., Lopes, J. & Costa, N. (2012). Formação continuada de professores de Física, em Angola, com base num modelo didático para o campo conceptual de força. *Revista Brasileira de Ensino da Física*, 34(3), 3402.

Pérez, N., González, S. (2003). Modelo didático para la formación de conceptos científicos en alumnos de Secundaria Básica. *Cad. Bras. Ens. Fís.*, 20(1), 98-116, Abr.

Pinto, D. (2008). *Proposta metodológica para a activação do processo de ensino aprendizagem da Física no Ensino Médio, mediante o uso de mapas conceptuais*. [Tese não publicada apresentada para a obtenção do Grau Científico de Mestre em Ensino das Ciências]. Universidade Agostinho Neto. Instituto Superior de Ciências da Educação. Lubango, Angola.

Ramos, J. (1993). *Metodología para la formación de conceptos de magnitudes físicas*. La Habana: Congreso Internacional Pedagogía '93.

Rasilla Cano, M., Olvera Aldana, M. & Martínez Álvarez, C. (2011). Formación de docentes en Didáctica de las Ciencias Experimentales. En *Memorias del I Congreso Internacional de educación superior*. Septiembre de 2011. Universidad Autónoma de Chiapas. Tuxtla Gutiérrez Chiapas, México.

Roa, Magdalena. (2008). Propuesta de enseñanza de los conceptos de trabajo y energía mecánica, fundamentada en la Teoría de Ausebel. Universidad Nacional del centro de la provincia de Bueno Aires, Argentina. *Revista Iberoamericana de Educación*. ISSN: 1681-5683. n° 44/7. Edita: Organización de Estados Iberoamericanos para la Educación, la Ciencia y la Cultura. 10 Enero de 2008.

Romero Chacón, Á. & Rodríguez, L. (2003). La formalización de los conceptos físicos. El caso de la velocidad instantánea. *Revista Educación y Pedagogía*, XV(35), enero-abril. Medellín: Universidad de Antioquia, Facultad de Educación.

Samoura, K. (1999). *Diseño de un modelo sistémico de dirección científica y metodológica de la educación física y el deporte*. [Tesis no publicada presentada en opción del grado científico de Doctor en Ciencias Pedagógica]. Instituto Superior de Cultura Física "Manuel Fajardo". La Habana, Cuba. p. 20.

FÍSICA DO PRESENTE E FUTURO – FORMAÇÃO PARA PROFESSORES EM LÍNGUA PORTUGUESA NO CERN

PRESENT AND FUTURE PHYSICS – CERN TEACHER TRAINING IN PORTUGUESE

Sofia Andringa¹
Pedro Abreu²

RESUMO

Já fazem 12 anos que o LIP co-organiza com o CERN formações para professores dos países de língua portuguesa, com o apoio da Agência Ciência Viva, que se focam não estritamente nos programas escolares, mas sim na física fundamental de partículas e áreas relacionadas. Baseiam-se no contacto directo dos professores com investigadores e são complementadas por visitas às grandes experiências no CERN. Os professores são destinatários directos, mas também veículos para chegar aos físicos do futuro e aos outros alunos, que podem não querer ser cientistas, mas (esperamos) sejam defensores da ciência. Para além das escolas de professores, conteúdos pensados para estudantes ou para a sociedade em geral seguem a mesma ideia: entusiasmar as pessoas, mostrando-lhes as questões fundamentais que motivam a investigação actual, a prática científica de as abordar em colaboração internacional, e os progressos recentes que mostram a ciência não apenas como conhecimento útil, mas como uma aventura ainda a ser feita. A história das escolas do CERN para professores de física em língua portuguesa pode ser um exemplo útil para pensar actividades de formação comuns numa União dos Físicos dos Países de Língua Portuguesa.

Palavras-chave: Física Fundamental, Física de Partículas, Formação de Professores, Internacional, Experimental, CERN.

EXTENDED ABSTRACT

CERN – the European Organization for Nuclear Research – is the world’s largest scientific organization, dedicated to fundamental science in particle physics and the technological developments needed for its research and, more recently with different applications, namely to medicine. It is an example of international collaboration, and pays great attention to training, education and outreach. CERN provides different training programmes for high school teachers, the ones given in the different languages of its member

¹ LIP - Laboratório de Instrumentação e Física Experimental de Partículas e SPF – Sociedade Portuguesa de Física, sofia@lip.pt

² LIP - Laboratório de Instrumentação e Física Experimental de Partículas, SPF – Sociedade Portuguesa de Física, IST – Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa, abreu@lip.pt

countries being the ones with higher reach. LIP, with the support of Agência Ciência Viva, organizes the programme for Portugal since 2007. Portugal was the first member state to open its national teachers programmes to teachers from non-member countries in 2009; and in 2011 it received teachers from all the Portuguese speaking countries: Angola, Brazil, Cabo Verde, Guiné-Bissau, Moçambique, Portugal, São Tomé e Príncipe and East Timor.

The number of Portuguese speaking teachers in these programmes attained 680 in 2019. If on average they teach 100 students per year, the programme will have direct impact on 68 000 students per year, and a million students will soon have contacted some teacher that now knows CERN. The impacts are different in each country, from the establishment of modern physics in the curriculum in East Timor, where they were absent, to the establishment of strong participation in one-day activities in which high school students analyse data from the CERN experiments. The IPPOG “masterclasses” are now a tradition in São Tomé e Príncipe and reach thousands of students per year in Portugal. Visits of the students to CERN has also increased in Portugal, and Brazil appears on the top of virtual visits to the ATLAS experiment.

The participating teachers were inquired in 2019 about their evaluation of the training programme and its longer term effects. By comparing the results obtained several years after their participation and between countries with different characteristics we conclude that the training is undoubtedly useful in providing teachers with a revision of modern physics and with tools to better answer the questions of curious students. The structure of the training, based on lectures and visits to experimental facilities delivered by Portuguese and Brazilian researchers, seems to fulfill those main goals. The focus on the relation between basic science and its technological applications and the promotion of experimental science in school are slightly less valued by the participants, and with larger differences between countries as could be expected. The teachers do propose follow up networks and continuous training that can probably be developed within the newly created Union of Physicists of Portuguese Speaking Countries (UFPLP).

The teacher training programme has been primarily designed for CERN member countries and the Portuguese edition is probably the one that puts together people from more different realities, and from four continents, with very different distances from CERN at all levels! So it is important to note that they value equally the access to training in modern fundamental physics, but that the ideal of international collaboration on basic science research, may lack examples that can be perceived in some realities. Again, the promotion of examples in other areas, or of school networks within the UFPLP would be a highly valuable addition.

All the participating teachers would like to see this training extended to a higher audience. Many value, as we do, its international character and

the possibility of meeting teachers with different backgrounds and facing different questions in their schools. Recent funding problems have reduced the programme in the last years and compromised the participation of some of the countries – joining bureaucratic questions that sometimes hindered an easier participation. We hope that the Union of Physicists of Portuguese Speaking Countries can help re-gain momentum for this project, as we have noticed immediate support in this conference.

CERN is the “center of the world” for the community of particle physicists, where many of the largest long term projects are carried out together with a large number of smaller projects, but also where the community meets and exciting knowledge is exchanged. The discovery of the Higgs boson in the Large Hadron Collider and the invention of the WWW, have also made it known to the general public – and it captures the imagination of both the would-by physicist and the other students, that can be drawn by the atmosphere of international cooperation and peace.

In this one week programme, the teachers have access to this international atmosphere and follow lectures in the morning, while in the afternoons they visit the experimental facilities, always accompanied by Portuguese and Brazilian researchers and engineers. They go from $E = mc^2$ to the electronics that run the experiments which discovered the Higgs boson. Staying at CERN, at the end of the day, they make a revision and have time for meeting and exchanging experiences among themselves. Increasingly many stay in contact with each other afterwards, using social media. Most keep following the news of this research area and bring them to their students in the years to follow. Many have gone on researching on their own, and bringing particle physics related activities to their students and colleagues. Many of the participants say the impact on each of their lives is beyond the realm of physics, and that will also be transmitted to their students.

Key-words: Fundamental Physics, Particle Physics, Teachers’ Formation, International, Experimental, CERN.

O CERN E A ESCOLA DE PROFESSORES EM LÍNGUA PORTUGUESA

Nascido após a Segunda Guerra Mundial, em 1954, como o Centro Europeu de Pesquisa Nuclear, o CERN é hoje a maior organização científica a nível mundial, dedicando-se à ciência fundamental em física de partículas com o desenvolvimento tecnológico necessário à sua investigação experimental. Muitas destas tecnologias têm aplicação noutras áreas e a sua tradução – nomeadamente na medicina – tem ganhado peso na comunidade da física de partículas e no seu reconhecimento exterior.

Situado na Europa, na fronteira entre a Suíça e a França, o CERN alberga o maior complexo de aceleradores de partículas do mundo e serve 60% da comunidade mundial de física de partículas: com um quadro de 2.200 cientistas, engenheiros e técnicos, é aberto a mais de 16.000 cientistas de 110 nacionalidades. A cada ano são publicadas mais de 500 teses de doutoramento baseadas em trabalhos desenvolvidos no CERN e há centenas de estágios de engenheiros das mais diversas especialidades. Desde a sua fundação é um exemplo de colaboração internacional e dedica hoje grande atenção à formação, à educação e à divulgação nas suas áreas de investigação. A cada ano recebe 130.000 visitantes, dos quais aproximadamente 70% são estudantes, e realiza formações que abrangem mais de 1.000 professores do ensino secundário, em diversos programas.

Em 2006, foi estabelecido o programa de formação para professores nas línguas nacionais dos países membros. A formação de professores em língua portuguesa é coordenada pelo LIP – Laboratório de Instrumentação e Física Experimental de Partículas –, que foi fundado em 1986 para acompanhar a adesão de Portugal ao CERN, concentrando os esforços nacionais nesta área. A primeira formação no CERN em língua portuguesa realizou-se logo em 2007, dirigida apenas a professores portugueses, mas o programa tornou-se o primeiro a receber também professores de países não membros, com a mesma língua, apenas dois anos depois.

Embora apenas Portugal seja membro do CERN, também o Brasil tem muitos investigadores ligados ao CERN. Numa visita das autoridades de Moçambique ao CERN, surgiu a vontade mútua de alargar a experiência também a este país. No ano de 2009, o LIP organizou uma formação para professores em São Tomé, ao mesmo tempo que promoveu uma conferência e uma exposição motivadas pelo 90º aniversário das observações de Eddington na Ilha do Príncipe – a primeira prova de relatividade geral que este ano também celebramos (essa exposição foi agora atualizada e reposta na Ilha do Príncipe). Os contactos foram rapidamente alargados até que, em 2011, participaram professores de todos os países de língua portuguesa.

UMA SEMANA DE FORMAÇÃO NO CERN

A formação para professores consiste numa semana muito intensa, de domingo a sexta-feira. À chegada ao CERN os participantes conhecem-se entre si e aos investigadores que os acompanharão a maior parte do tempo e visitam logo algumas das áreas expositivas. Nos dias seguintes ficam instalados no CERN e têm palestras que fazem a revisão da física moderna, dos resultados recentes na física de partículas, nomeadamente os obtidos nas experiências do CERN, e das grandes questões em aberto nas áreas relacionadas.

Uma das vantagens em fazer a formação no CERN é que ela dá acesso em primeira mão ao ambiente de investigação internacional: uma ideia das condições de trabalho real dos cientistas e engenheiros que trabalham nesta grande organização. Mas a mais importante é que as palestras podem ser seguidas por visitas às instalações experimentais que permitem chegar aos resultados e, portanto, tornar mais claros os métodos utilizados.

Assim, se pela manhã se discute a descoberta do bóson de Higgs no grande colisionador de hádrons (LHC), à tarde pode-se visitar a cadeia de aceleradores do CERN – o acelerador linear que acelera os primeiros prótons saídos de simples garrafas de hidrogénio, a sala de controlo da grande cadeia de aceleradores até se atingirem as energias requeridas pelo LHC, um dos detectores que rodeiam os pontos de colisão entre prótons de mais alta energia, as salas de controlo onde os vários subdetectores são monitorizados, ou o centro de computação onde são transferidos os dados recolhidos pelas experiências para serem acessados pelos cientistas espalhados pelo mundo.

Na escola em português, tanto as palestras como as visitas são realizadas por investigadores portugueses e brasileiros que explicam diretamente o seu trabalho e se disponibilizam para explicá-lo em detalhe e responder a todo o tipo de perguntas, mais técnicas ou mais de curiosidade, inclusive sobre os seus percursos.

A proposta é que os professores sejam não só actualizados na ciência e na técnica, mas também que possam estar mais à vontade para passar aos seus estudantes a ideia de que é possível que venham a participar ativamente na produção de conhecimento científico. No CERN, cobrem a distância do $E=mc^2$ à descoberta do bóson de Higgs, do local onde nasceu o *www* à tecnologia da GRID, hoje usada para partilhar os dados das experiências com os investigadores espalhados por laboratórios em todo o mundo.

Abordam-se a imagiologia PET – tomografia por emissão de positrões –, em que se detecta a aniquilação de antipartículas, positrões emitidos por um isótopo radioativo, com eletrões do corpo humano, produzindo dois fótons de muito alta energia em direções opostas, com os mesmos métodos usados nestas grandes experiências. Ou a Hadro Terapia (similar à radioterapia, com feixes de prótons em vez de fótons gama), que permite ajustar não só a dose e a direção de penetração da radiação, mas também localizar a profundidade em que ocorrerá a maior deposição de energia (resultando num tratamento muito mais eficaz do paciente).

Os professores têm assim uma formação com um ritmo exigente e em que se lhes pede uma dupla condição: de estudantes eles próprios e de diplomatas que façam as suas próprias perguntas, mas também as dos seus alunos atuais e futuros, tanto os alunos que adoram a física e que podem querer vir a trabalhar na divisão teórica ou nas experiências do CERN como os mais interessados na tecnologia, que quererão saber quais os desenvolvimentos que

estão a ser trazidos pelos desafios exigentes destas experiências. Mesmo os que não são apaixonados pela ciência podem ver a sua tradução em aplicações de uso mais geral, como a medicina. A todos, mostrar que a ciência não é um saber acabado mas um questionar constante em que cada resposta abre mais questões fundamentais e em que a procura da resposta leva ao desenvolvimento de novas tecnologias que depois se refletem noutras áreas. E mostrar também o empenho, a dedicação e as diferentes formas de trabalho em colaboração internacional, por vezes a grande distância.

DOS VÁRIOS PAÍSES DE LÍNGUA PORTUGUESA PARA O CERN

A participação de cada país na formação para professores em língua portuguesa foi variando ao longo do tempo. Portugal e Brasil foram distribuindo entre si o maior número de participantes, de 20 a 40 por ano. De Angola e da Guiné-Bissau não voltou a haver participação após 2011, mas nesta conferência foram já retomados contatos com Angola e espera-se a participação de professores angolanos na próxima edição; um primeiro professor que fazia formação em Portugal representou Timor-Leste em 2011, e nos dois anos seguintes o Ministério da Educação enviou grupos de três professores, que depois ajudaram a implementar a física moderna no currículo escolar; São Tomé e Príncipe enviou sempre um professor em cada ano, assim como fez Cabo Verde na maior parte das edições; de Moçambique participaram quatro professores por ano até 2015.

A partir de 2016, o financiamento do programa pela Agência Ciência Viva, responsável pela divulgação científica em Portugal, foi reduzido, pondo em causa a participação dos professores de vários países e diminuindo a participação portuguesa. Também no Brasil o financiamento do programa foi variando, sendo garantido por diferentes agências ao longo do tempo e com fundos por vezes investidos pelos professores participantes.

Em 2015, a Sociedade Brasileira de Física publicou um livro, *Nós, professores brasileiros de Física do Ensino Médio, estivemos no CERN* (Garcia, 2015), e em 2018 realizou um inquérito global. Já em 2019, o LIP decidiu fazer um inquérito global a todos os participantes, que se junta à informação recolhida a cada ano, para avaliação do programa. Aqui focaremos em especial esses resultados, tentando enquadrá-los com informação anterior.

Neste inquérito, obtivemos 259 respostas de um total de 680 professores que participaram nesta formação ao longo dos anos. A participação e a taxa de resposta são apresentadas no quadro seguinte. Note-se que alguns dos professores deram depois aulas noutros países, nomeadamente um de Moçambique em Portugal, três de Portugal em São Tomé e Príncipe e dois em Timor-Leste.

QUADRO 1. Distribuição por país dos participantes na formação e dos respondentes ao inquérito.

	Participantes na formação	Respostas ao inquérito	Taxa de resposta
Portugal	406	153	38%
Brasil	225	90	40%
Moçambique	25	12	48%
São Tomé e Príncipe	7	2	29%
Timor-Leste	7	1	14%
Angola	4	1	25%
Cabo Verde	5	0	0%
Guiné-Bissau	1	0	0%

As respostas estão bem distribuídas entre os vários anos e não se encontram diferenças significativas, quer no nível de resposta, quer no tipo de resposta, e assim sendo foram analisadas em conjunto. No entanto, a relação com o CERN e a investigação em física de partículas, e as escolas e condições de trabalho de professores e alunos são muito diferentes nos vários países. Para controlar esse efeito, os resultados são comparados entre Portugal, Brasil e Moçambique, que, embora tenha poucas respostas, terá condições mais semelhantes às dos países em falta e permitirá tirar algumas ilações sobre eventuais diferenças nas respostas entre três realidades distintas:

- Em Portugal, os professores dão aulas de ciências físico-químicas (separadas em Física e Química apenas no último ano) a duas a seis turmas que têm entre 20 e 30 alunos no ensino secundário;
- No Brasil, os professores dão aulas a 4 a 10 turmas, cada uma com 30 a 45 alunos, e tendem a dar aulas em mais escolas e vários níveis de ensino (Física e Química separadas no ensino médio);
- Em Moçambique, cada professor pode ter um maior número de turmas, de 10 a 15, e as turmas tendem a ser muito maiores, de 50 a 60 alunos; a Física e a Química costumavam estar divididas, mas podem vir a ser juntas também com a Biologia.

A formação internacional e intensiva pretende também estimular o contacto entre professores e investigadores, e entre os vários participantes, para troca de experiências. O gráfico abaixo sumariza o nível de contacto mantido depois da formação, comparado com a avaliação do contacto durante a escola. Cerca de metade dos professores brasileiros e portugueses afirma manter um contacto regular com outros depois da escola, mas menos de 10% o fazem com os professores de outros países, sendo que muitos não mantêm nenhum. Mas sabemos, por exemplo, que todos os 20 portugueses e 20 brasileiros da edição de 2018 se mantêm em contacto pelas redes sociais – o que provavelmente aumentará no futuro, com o aumento de utilização destas plataformas de partilha de informações.

QUADRO 2. Avaliação dos contatos durante a formação (média numérica de 1 a 5) e manutenção de contato após a formação (nenhum, regular, frequente).



Com os investigadores presentes na escola do CERN, os contactos são mais esporádicos, exceto para os professores que depois mantêm actividades directamente ligadas à física de partículas.

A escola é em geral bem avaliada pelos professores não apenas imediatamente depois, mas também muitos anos depois. A maior parte dos comentários recebidos é elogiosa e de ânimo a manter a escola e alargar a participação a mais professores.

DO CERN PARA A COMUNIDADE DOS PAÍSES DE LÍNGUA PORTUGUESA - CPLP

Tendo levado ao CERN 680 professores, e pensando que cada um deles chega a 100 alunos por ano, o programa terá impactado mais ou menos directamente mais de 68.000 estudantes por ano – rapidamente meio milhão de jovens terá contactado com professores que estiveram no CERN.

Em Portugal, a participação nas Masterclasses em Física de Partículas organizadas pelo International Particle Physics Outreach Group (IPPOG) tem vindo a subir à medida que mais professores conhecem o CERN. Hoje, cerca de 2.000 estudantes do ensino secundário passam um dia na Universidade a analisar e discutir dados reais obtidos pelo LHC no CERN. Naturalmente, esta e outras atividades de divulgação são dirigidas aos alunos motivados pela física, mas também aos que têm interesse em áreas relacionadas. No entanto, esta é uma das maiores atividades de divulgação de física no país e não lhe será alheio o facto de que, em 2018, o curso de Engenharia Física Tecnológica, no IST da Universidade de Lisboa, teve uma elevada procura, que se refletiu na maior nota mínima de ingresso requerida pelos *números clausus* em vigor em Portugal. Mais importante é talvez o facto de que, desde 2015, todos os cursos de física e engenharia física em Portugal preencheram o total das suas vagas nas primeiras fases de candidaturas ao ensino superior.

No Brasil, os professores que foram ao CERN – de todos os estados e grande diversidade de tipos de escola – deram palestras para muitos diferentes públicos e foram, frequentemente, objeto de notícia nos meios de comunicação das suas localidades. Sendo muitos os que participaram, vários referiram

terem depois começado pós-graduações. Como impacto mais singular e talvez inesperado, uma das professoras escreveu um livro de física de partículas para crianças, que até deu origem a um musical (Takimoto & Conte, 2019)! Em 2019, foi criada uma formação muito semelhante no Laboratório Nacional de Luz Síncrotron, em Campinas.

Em São Tomé e Príncipe também as Masterclasses em Física de Partículas se tornaram uma actividade regular incontornável anual para várias das escolas secundárias existentes (Carvalho, 2019).

Em Timor-Leste a física nuclear foi introduzida no currículo do ensino secundário como primeiro exemplo da física moderna e suas aplicações, como advoga este programa de formação.

A manutenção do contacto entre os professores e os investigadores presentes na escola se traduz, em muitos casos, pela organização de palestras ou visitas ao CERN e pela participação nas Masterclasses. É interessante notar que, além de terem aumentado muito as palestras nas escolas e as visitas de escolas portuguesas ao CERN, as escolas brasileiras aparecem em destaque nas visitas virtuais à experiência ATLAS, uma das colaborações do LHC onde o Brasil participa.

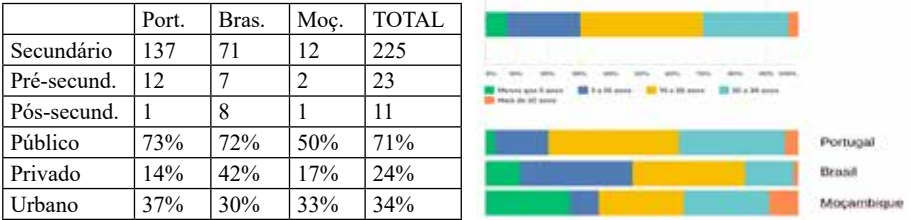
PARTICIPAÇÃO NO PROGRAMA E AVALIAÇÃO GERAL

A escolha de professores para participar no programa é feita por cada um dos países, que têm tido a preocupação de assegurar a não discriminação, por exemplo, por género, mas também no nível de experiência de ensino ou distribuição geográfica.

Em Portugal, a seleção de professores feita pelo LIP tem em conta, por exemplo, a participação em actividades extracurriculares. Em São Tomé e Príncipe, a seleção dos professores é da responsabilidade da Universidade de São Tomé, que faz a sua formação e tem seleccionado professores que tenham concluído o mestrado. Em Moçambique e nos outros países, é da responsabilidade dos Ministérios da Educação. No Brasil, o programa foi mudando ao longo do tempo e, com a sua evolução, também a seleção de professores participantes, mas garantindo sempre uma grande abrangência entre os vários estados.

A seguir mostram-se as escolas de proveniência dos professores que responderam ao inquérito e os três países de referência. Nota-se que os professores do Brasil e Moçambique acumulam mais escolas e níveis de ensino. A participação de professores com menos de cinco anos de experiência parece seguir as pirâmides etárias dos três países.

QUADRO 3. Escolas em que lecionam (esquerda) e há quanto tempo (direita) os professores de Portugal, Brasil e Moçambique que responderam ao inquérito.

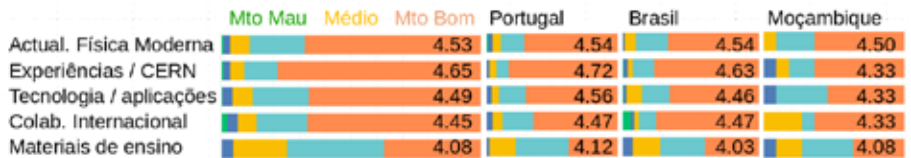


É muito claro no livro publicado pela Sociedade Brasileira de Física que para muitos professores esta é a primeira experiência fora do Brasil e até do seu Estado, num país tão grande, com outros impactos para além daqueles que são centrais no programa de formação. Assim, o programa brasileiro inclui um primeiro encontro de todos em Lisboa, incluindo uma visita ao LIP antes da chegada ao CERN.

Por outro lado, é de referir que as dificuldades burocráticas na obtenção dos vistos têm limitado a participação dos professores dos países africanos. Não é evidente como ultrapassar esta questão, a não ser com uma maior atenção por parte das autoridades dos diversos países e mais ajuda aos professores candidatos neste processo.

Vários dos professores consideram que seria útil uma formação uns anos depois do programa no CERN, em que pudessem também partilhar experiências. Outros referiram, logo nos inquéritos feitos no fim de cada edição, que era importante ter elementos de pré-formação antes da chegada ao CERN. Ambos os desafios ficam aqui em aberto. Note-se que estes outros encontros de formação não teriam de ser realizados no CERN, mas seriam muito úteis para fortalecer as competências dos participantes, nomeadamente com a troca de experiências de como aplicar os conteúdos desta formação mais em concreto no ensino.

QUADRO 3. Avaliação das várias facetas da formação de muito mau (verde, 1) a muito bom (laranja, 5): atualização em física moderna, contato com as experiências do CERN, exemplos de tecnologias e colaboração internacional e fornecimento de novos materiais de ensino.



O quadro anterior mostra a avaliação geral das várias facetas da escola. 65% consideraram muito boa a actualização em física de partículas. Apenas nove professores deram a classificação de “mau” (e um muito mau!). Mesmo estes classificam como “médio” os outros pontos e consideram que o impacto nas aulas foi médio/grande, não ficando claro quais expectativas não foram concretizadas. Os exemplos de tecnologias e aplicações e de colaboração internacional tiveram classificações apenas ligeiramente mais baixas do que a física moderna e de partículas.

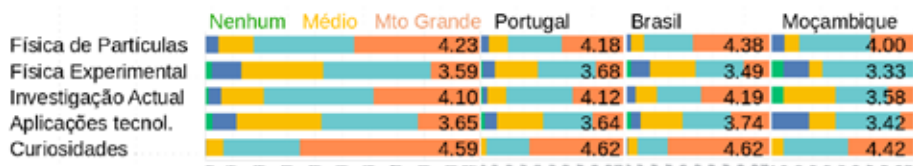
O contacto com o CERN e as suas experiências foi a faceta da escola mais bem classificada pelos professores de Portugal e do Brasil, mas não pelos de Moçambique. Esta diferença nota-se também, embora em menor escala, nos exemplos de tecnologia e aplicações e nos exemplos de colaboração internacional, a que Portugal e Brasil dão a mesma pontuação média, bem maior do que Moçambique. Este ponto merece reflexão e pode ser semelhante para os outros países de que não temos resposta e que não participam no mesmo nível na investigação fundamental e aplicada, em particular no CERN. A procura de outros exemplos mais aplicáveis a essas realidades pode ser aqui um ponto relevante a melhorar para tornar o programa mais interessante a todos.

O ponto menos bem avaliado é o fornecimento de materiais para o ensino. De facto, não sendo esse o principal foco da escola, é aquele que os professores mais gostariam de ver melhorado.

IMPACTO NAS AULAS E FORA DAS AULAS

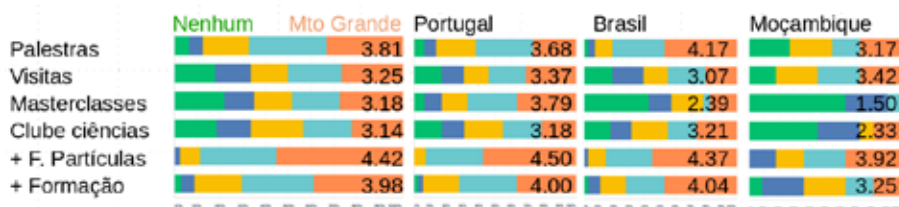
Sendo que os temas da escola não ocupam muito espaço nos currículos escolares, o impacto maior em sala de aula é o de aumentar a confiança dos professores para responder a questões e curiosidades dos alunos. Mas, para os participantes de todos os países, a formação permitiu também introduzir a física de partículas nas aulas. De facto, embora em menor grau, parece ajudar a abordar a investigação científica actual em geral, embora menos as técnicas experimentais da física e as suas aplicações.

QUADRO 4. Avaliação do impacto da formação na preparação para as aulas.



Em geral, os professores que consideram que a formação teve grande impacto na introdução da física de partículas nas aulas não são os que melhor classificam os outros parâmetros da escola, mas sim os mesmos que desenvolvem mais actividades fora das aulas, ou seja, depende muito não só da sua motivação pessoal, mas também da possibilidade que têm ou não de ir além dos programas da escola. A classificação do impacto para além das aulas é apresentada no quadro seguinte.

QUADRO 5. Avaliação do impacto da formação em actividades extracurriculares.



Destaca-se a vontade destes professores em saber mais sobre física moderna e física experimental de partículas. Muitos dos professores referiram também que procuraram novas formações em física moderna. No Brasil, há três professores a fazer o doutoramento e vários participaram noutros cursos de formação em física moderna para professores. Pelo menos um professor participou do programa mais longo, e em inglês, no CERN.

Em termos de actividades realizadas para os alunos ou comunidade escolar, o grande impacto é na organização de palestras. Aqui também os professores brasileiros se destacam, sendo que vários referem ter dado eles próprios palestras sobre as suas experiências ao regressar ao Brasil, na sua escola, ou noutras escolas e para outros públicos (naturalmente mais nos primeiros anos).

Já foram referidas antes a organização de visitas ao CERN (nomeadamente visitas virtuais para o Brasil e Moçambique) e as Masterclasses, que têm grande participação em Portugal e menor no Brasil (e não se realizam em Moçambique, mas sim em São Tomé e Príncipe). À parte estas, são também realizadas outras actividades extracurriculares com alunos, por exemplo, a participação no projecto *beamline for schools*, do CERN.

É no impacto em todas estas actividades extracurriculares que se vislumbra alguma correlação com a experiência de ensino ou, talvez, a posição dos professores nas escolas: em média, os professores com mais experiência classificam melhor o impacto nestas actividades. Por outro lado, também é ligeiramente maior nas áreas rurais do que nas urbanas, em Portugal.

MAIS MATERIAIS PARA A ESCOLA?

Na avaliação do impacto da formação na introdução dos temas nas aulas não se notam diferenças significativas, conforme a experiência de ensino dos professores, mas para todos os temas referidos, nas aulas ou fora delas, há correlações directas com a classificação dada à capacidade da escola de fornecer novos materiais e técnicas de ensino. Torna-se claro que a formação não fornece fórmulas sobre como introduzir as questões, mas ferramentas para que os professores mais motivados o façam.

O objetivo não é de facto o de fornecer directamente materiais para o ensino, mas sim alargar os horizontes e permitir que os professores estejam à vontade para trazer a investigação científica actual para a sala de aula, podendo dar exemplos concretos sobre a física experimental feita no CERN e sobre o impacto da investigação nas tecnologias de diversos usos. Mas nota-se que, quando são propostas directamente outras actividades, elas são bem acolhidas; veja-se o exemplo das masterclasses e das visitas ao CERN, que levam ao contacto directo dos estudantes com a investigação.

Na formação base para professores no CERN está incluída uma sessão em que se monta um detector de partículas – uma câmara de nuvens que pode ser replicada em sala de aula. E o LIP criou recentemente em Lisboa um laboratório para apoiar esta e outras actividades mais experimentais, que pode ser usado por turmas das escolas da região. Nas últimas edições do programa em português, tem sido também dada mais atenção às possibilidades de explorar os dados de várias experiências em sala de aula, à imagem simplificada do que se faz nas masterclasses do IPPOG.

Os professores participantes indicam outras formas de melhorar este ponto. Sugerem que haja mais troca de experiências e exemplos de professores que participaram anteriormente (e até que faça parte da formação e da sua avaliação a elaboração de um programa de ação na escola). Muitos sugerem ações de formação mais tarde, que permitiriam explorar esses exemplos. Embora os professores já mantenham mais contactos directos entre si do que com os investigadores, estes poderiam ajudar neste objetivo. Este encontro não teria de ser no CERN e podia ser separado em Portugal e no Brasil, onde os números são já grandes.

CONCLUSÃO E DESAFIOS

Em conclusão, o Programa de Formação de Professores no CERN em Língua Portuguesa é um sucesso em todos os níveis, como se nota pela participação consistente dos professores destes três países e pela sua avaliação, quer da formação em si, quer do seu impacto nas aulas e nas escolas. Eventuais

pontos a melhorar – para passar de muito bom a excelente – estão identificados e devem ser trabalhados em fóruns mais gerais. Os professores que participaram na formação e responderam às avaliações anteriores e ao inquérito em 2019 propõem, entre outras coisas, uma plataforma de recursos em português, cursos de atualização posteriores (que poderão não ser no CERN e mesmo ser virtuais) e redes de escolas para cooperação e para se encontrarem novas actividades possíveis para escolas com realidades muito diferentes. A União dos Físicos dos Países de Língua Portuguesa pode ser um bom ponto de partida para analisar algumas destas questões mais a fundo.

A formação no CERN segue de perto o formato internacional desenhado para os países membros e é, portanto, interessante comparar os vários países para saber se também é adequada para os outros. Se algo ressalta nessa comparação é que o impacto na introdução da Física de Partículas e Aplicações nas aulas é relativamente semelhante, e apenas ligeiramente menor na Ciência Actual e Física Experimental, provavelmente devido às diferentes condições na escola. Mas as outras facetas da formação, que não a actualização em física moderna, merecem uma menor avaliação nos países que têm menos relação com o CERN. Como e que mensagem podem passar aos alunos da sua experiência no CERN? Que exemplos da ciência e tecnologia desenvolvida nas grandes colaborações internacionais lhes podemos fazer chegar?

Aqui cabem os exemplos da evolução da educação e da participação no desenvolvimento científico e tecnológico, nos diversos países, de tecnologias mais geralmente acessíveis, por exemplo, nos hospitais. A participação de Moçambique no projecto de radioastronomia, SKA, um projecto de ciência global num futuro não tão longínquo, é um tema a explorar. Deve-se fornecer informação sobre possibilidades de formação aos vários níveis para o professor e seus alunos e também apostar-se nas propostas de actividade que os estudantes possam realizar em conjunto com os de outros países (à imagem da participação consistente de São Tomé e Príncipe nas Masterclasses).

Finalmente, num momento em que restrições financeiras levaram a uma redução do número de professores de Portugal e Brasil e a que os outros países deixassem de participar, contamos com a União dos Físicos dos Países de Língua Portuguesa para apoiar esta e outras ações de formação conjunta.

REFERÊNCIAS

Carvalho, L. (2019). A Participação Santomense nas Masterclasses Internacionais de Física das Partículas. *Actas da 3a Conferência de Física da Comunidade de Países de Língua Portuguesa*.

Garcia, N. M. D. (Org.). (2015). *Nós, professores brasileiros de Física no ensino Médio, estivemos no CERN*. São Paulo: SBF-Sociedade Brasileira de Física e LF-Editorial. Disponível em: http://www.sbfisica.org.br/v1/escolacern/arquivos_diversos/Nos-professores-brasileiros-de-Fisica-estivemos-no-CERN_2.pdf

Takimoto, E., & Conte, S. R. (2019). *Isaac no mundo das partículas*. Edição de autor. Disponível em: <https://elikatakimoto.com/isaac-no-mundos-das-particulas/>

CLUBE DE CIÊNCIA, TECNOLOGIA E AMBIENTE

SCIENCE, TECHNOLOGY AND ENVIRONMENT CLUB

André Freitas¹
Bruno Dias²
Marina Balbina³
Prudência Valente⁴
Sílvia Correia⁵

RESUMO

Os Clubes de Ciência constituem-se espaços de natureza interdisciplinar de educação científica, uma vez que se dialoga com as diversas áreas do conhecimento, e visam ao desenvolvimento de competências complementares entre si a nível da informação e comunicação, do raciocínio e resolução de problemas, do pensamento crítico e criativo, do relacionamento interpessoal, da autonomia e desenvolvimento pessoal, do bem-estar e saúde e do saber técnico e tecnológico. A contextualização e a problematização assumem-se como ferramentas para a construção de um ensino de Ciências de qualidade, contribuindo para uma formação mais integral e participativa dos estudantes. Uma atitude de questionamento face às situações-problema do dia a dia deve ser estimulada ao longo da vida escolar, contribuindo para o exercício de uma cidadania ativa e responsável. A dinâmica do clube de ciência implica grande envolvimento e motivação de todos os intervenientes, professores, alunos, direções das escolas e agentes parceiros. Só deste modo o trabalho que ali se desenvolve pode se tornar significativo e indicador de um espaço alternativo e complementar à aprendizagem científica e de ampliação das potencialidades, na certeza de que, na construção do conhecimento científico, a capacidade de pensar e agir é fator determinante para uma ação mais consciente, crítica, competente e transformadora.

Palavras chave: Clubes de Ciência, Raciocínio e resolução de problemas, Informação e comunicação, Saber técnico e tecnológico.

EXTENDED ABSTRACT

The school teaching of the 21st century, is taking into account the challenges that society is currently facing, intends to promote a scientific culture as well as an education for science and technology, through a joint intervention between all members of the educational community, by participating in initiatives on national and international level. The Portuguese School of São Tomé

¹ Escola Portuguesa de São Tomé e Príncipe – CELP, afreitasepstpcelp@gmail.com

² Escola Portuguesa de São Tomé e Príncipe – CELP, bdiaspstpcelp@gmail.com

³ Escola Portuguesa de São Tomé e Príncipe – CELP, mbalbinaepstpcelp@gmail.com

⁴ Escola Portuguesa de São Tomé e Príncipe – CELP, pvalenteepstpcelp@gmail.com

⁵ Escola Portuguesa de São Tomé e Príncipe – CELP, scorreiaepstpcelp@gmail.com

and Príncipe – Center of Teaching and Portuguese Language (EPSTP-CELP) is oriented to provide the opportunity for the acquisition of essential skills necessary for the development of a scientific culture, promoting autonomy, critical capacity and creativity in the students and giving them the ability to relate in a multicultural world. For the development of different skills, concerning scientific, technical and technological knowledge, practical and experimental work, interdisciplinarity and team work are valued, putting knowledge in context with situations that approach real problems. The school's Science, Technology and Environment Club aims to promote cooperation work and the establishment of partnerships with institutions related to science and technology in Portugal and São Tomé and Príncipe. The club is an educational workspace where knowledge is built in an environment of cooperation and partnership. Its main purpose is to develop interest and motivation in the student's to learn science, providing them with moments of pleasant interaction surrounding reality or world and the world of science, making learning adapted to fit each individual's abilities and interests. In this relaxed environment, curiosity, creativity and knowledge, which are essential to the challenges of this century, develop simultaneously. The learning process based on curiosity and the search for knowledge makes the student an active agent, not only in the intellectual aspect, but also in social relations, inside and outside the classroom. The activities to be developed in the projects presented by the club seek to promote multidisciplinary work, creating bridges between different areas of knowledge and also the development of multiple skills, both theoretical and practical. The following activities stand out:

- **“Rubrica Eco-Espaço”**, integrated in the Radio Program “Escola Portuguesa em Ação” in partnership with Rádio Jubilar of São Tomé and Príncipe, in which topics related to Environmental Education are addressed weekly. It aims to educate informed and critical citizens, as future agents that promote change in the environment in which they live;

- **“Cientistas de Palmo e Meio”**, this is a project in which activities are promoted in the 1st cycle of basic education combined with the study of the environment, in order to stimulate scientific curiosity and provide the practice of experimental sciences that will constitute a sustainable basis for future learning in the area of Science;

- **Asteroid Search Campaign** organized by the International Astronomical Search Collaboration (IASC) and represented in Portugal by the Interactive Nucleus of Astronomy (NUCLIO) and integrated in the “Near Earth Object” (NEO) program of NASA's Jet Propulsion Laboratory. This activity of the “All Asteroid Search Campaign” aims to promote scientific research in Astronomy, in schools, through the analysis of images of the night sky.

- **Erathosthenes Experiment 2020**, an international project that aims to recreate the ingenious measurement of the perimeter of our planet.

– **International Masterclasses hands on particle physics** in partnership with the University of São Tomé and Príncipe and LIP - Laboratory of Instrumentation and Particle Physics.

– **Ciência Viva Project**, integrated in the Clubs Network “Ciência Viva na Escola”, functioning as an open space of contact with science and technology, for education and for the generalized access of students to scientific practices. “SCIENCE OUTSIDE THE BOX” was the theme chosen with the aim of promoting several activities involving students from the 1st to the 12th years of schooling with a focus on sustainability, optics, electricity, space sciences and electronics. The scenario of this project is developed in four aspects: Learning how to do - elaboration of educational kits and training of trainers, Teaching by doing - trainers organize workshops for the school community; Science for All - taking science on wheels to São Tomé public schools, with the organization of workshops and Communicating Science - through Science Meetings with Professor Doctor Carlos Fiolhais.

The activities developed at the Science, Technology and Environment Club are based on the guiding principles of EPSTP-CELP, where non-formal and formal education are not distinguished, but are complemented by the promotion of numerous projects, which enable the acquisition of skills and the learning mobilization. The activities promoted at the Club are guided by criteria of scientific and pedagogical quality, stimulating enthusiasm and motivation through the practical exploration of Sciences in different thematic areas. It seeks to encourage multidisciplinary work, involving partnership work between teachers and complemented with partnerships established with researchers and external scientific institutions. The synergies of all the incentive work that result from the various activities, lead to a student involvement that enhances creativity and innovation in a school that wants to be more and more dynamic and capable of responding to a society in permanent change.

Key words: Science Clubs, Reasoning and problem solving, Information and communication, Technical and technological knowledge.

O CLUBE DE CIÊNCIA NA EPSTP-CELP

A escola do séc. XXI, tendo em conta os desafios que atualmente se colocam à sociedade, pretende promover a cultura científica e a educação para a ciência e tecnologia, por meio de uma intervenção colaborativa entre todos os membros da comunidade educativa, participando em iniciativas em níveis nacional e internacional.

A Escola Portuguesa de São Tomé e Príncipe – Centro de Ensino e da Língua Portuguesa (EPSTP-CELP) pauta-se por proporcionar a oportunidade para a aquisição de competências indispensáveis ao desenvolvimento de uma

cultura científica, promovendo a autonomia, o espírito crítico e a criatividade nos alunos e a capacidade de se relacionarem num mundo multicultural.

Para o desenvolvimento de diferentes competências, nomeadamente de saber científico, técnico e tecnológico, é valorizado o trabalho prático e experimental, a interdisciplinaridade e o trabalho em equipa, contextualizando o conhecimento em situações que se aproximem dos problemas reais.

O Clube de Ciência, Tecnologia e Ambiente da escola visa promover o trabalho colaborativo e estabelecer parcerias com instituições ligadas à ciência e tecnologia de Portugal e de São Tomé e Príncipe. O clube é um espaço pedagógico onde se constrói conhecimento num clima de cooperação e solidariedade. Tem como papel principal estimular o interesse e a motivação dos alunos para aprender Ciências, proporcionando-lhes momentos de agradável interação entre o mundo que os rodeia e o mundo da ciência, fazendo acontecer aprendizagens que se adequam às capacidades e interesses individuais de cada um. Neste ambiente descontraído, desenvolvem-se em simultâneo a curiosidade, a criatividade e o conhecimento, essenciais aos desafios deste século. O processo de aprendizagem fundamentado na curiosidade e na busca do conhecimento faz com que o aluno se torne um agente ativo, não só no aspeto cognitivo, mas também nas relações sociais, dentro e fora da sala de aula.

As atividades a desenvolver nos projetos propostos pelo clube procuram promover o trabalho multidisciplinar, criando pontes entre as diversas áreas do saber e o desenvolvimento de múltiplas competências, teóricas e práticas. Destacam-se as seguintes atividades:

- **Rubrica Eco-espço**, integrada no Programa de Rádio “Escola Portuguesa em Ação”, em parceria com a Rádio Jubilar de São Tomé e Príncipe, na qual, semanalmente, são abordados temas no âmbito da Educação Ambiental. Tem em vista a formação de cidadãos informados e críticos, futuros agentes promotores de mudança no meio em que vivem;

- **Cientistas de Palmo e Meio**, em que são promovidas atividades no primeiro ciclo do ensino básico em articulação com a disciplina de Estudo do Meio, com o intuito de estimular a curiosidade científica e proporcionar a prática de ciências experimentais que irão constituir uma base sustentável para futuras aprendizagens na área da Ciência;

- **Caça aos Asteroides**, organizada pela International Astronomical Search Collaboration (IASC), representada em Portugal pelo Núcleo Interactivo de Astronomia (NUCLIO) e integrada no programa “Near – Earth Object” (NEO), do Jet Propulsion Laboratory da NASA. Esta atividade do “All Asteroid Search Campaign” pretende promover a investigação científica em Astronomia, nas escolas, por meio da análise de imagens do céu noturno;

- **Experiência de Eratóstenes 2020**, projeto internacional que pretende recriar a medição engenhosa do perímetro do nosso planeta;

– **Masterclasses Internacionais em Física de Partículas**, em parceria com a Universidade de São Tomé e Príncipe e o LIP – Laboratório de Instrumentação e Física de Partículas;

– **Projeto Ciência Viva**, integrado na Rede de Clubes Ciência Viva na Escola, funcionando como espaço aberto de contacto com a ciência e a tecnologia, para a educação e para o acesso generalizado dos alunos a práticas científicas. “Ciência fora da Caixa” foi o tema escolhido com o intuito de dinamizar diversas atividades destinadas a envolver os alunos do 1º ao 12º anos de escolaridade com foco em sustentabilidade, ótica, eletricidade, ciências do espaço e eletrónica. O cenário deste projeto desenvolve-se em quatro vertentes: **Aprender a Fazer** – elaboração de *kits* educativos e formação de monitores; **Ensinar Fazendo** – os monitores dinamizam *workshops* para a comunidade escolar; **Ciência Para Todos** – levar às escolas públicas de São Tomé a ciência sobre rodas, com a dinamização de *workshops*; e **Comunicar Ciência** – por meio de Encontros de Ciência com o Professor Doutor Carlos Fiolhais.

As atividades desenvolvidas no Clube de Ciência, Tecnologia e Ambiente têm como base os princípios orientadores da EPSTP-CELP, onde não se distingue o ensino não formal do formal, antes se complementam pela promoção de inúmeros projetos, que possibilitam a aquisição de competências e a mobilização de aprendizagens. As atividades promovidas no Clube orientam-se por critérios de qualidade científica e pedagógica, estimulando o entusiasmo e a motivação por meio da exploração prática das Ciências em diferentes áreas temáticas. Procura-se incentivar o trabalho multidisciplinar, implicando um trabalho colaborativo entre os professores e complementado com as parcerias estabelecidas com investigadores e instituições científicas externas.

As sinergias de todos os estímulos que resultam das várias atividades conduzem a um envolvimento dos alunos que potencia a criatividade e inovação numa escola que se quer cada vez mais dinâmica e capaz de responder a uma sociedade em mudança permanente.

REFERÊNCIAS

Clubes Ciência Viva na Escola. Clubes Ciência Viva na Escola de <https://clubes.cienciaviva.pt>

Martins, G., Gomes, C., Brocardo, J., Pedroso, J., Carrillo, J., Silva, L., Encarnação, M., Horta, M., Calçada, M., Nery, R., & Rodrigues, S. (2017). *Perfil dos Alunos à Saída da Escolaridade Obrigatória*. Disponível em <https://www.dge.mec.pt/noticias/perfil-dos-alunos-saida-da-escolaridade-obrigatoria>

ESTUDO E APLICAÇÃO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO ISOLADO COMO FONTE DE ENERGIA ELÉTRICA

STUDY AND APPLICATION OF AN ISOLATED PHOTOVOLTAIC SYSTEM AS AN ELECTRICAL ENERGY SOURCE

Jermano Manuel Francisco dos Santos¹
Serghei Psar²

RESUMO

A aplicação da energia solar é atual para a África. Angola já tem projetos de instalação das grandes estações dos sistemas fotovoltaicos (SFV) no sul do país. Existem problemas de falta de quadros nacionais nestas áreas. Apesar de a Universidade Agostinho Neto (UAN) ainda não ter esta especialidade, o DEI de Física deu início à preparação de alguns especialistas em áreas das energias renováveis. Este trabalho é fruto de pesquisa dos estudantes finalistas do curso de Física, tendo os mesmos participado na realização com sucesso do projecto de instalação do SFV isolado com a potência de 24 kW, na região Cabo Ledo (Angola), com a empresa Racara-Energias Renováveis. O trabalho apresenta um estudo relacionado ao aproveitamento artificial da energia solar pelo efeito fotovoltaico, incluindo o princípio de funcionamento de um sistema fotovoltaico isolado, principais aplicações, vantagens e desvantagens, bem como o aspecto geral da montagem e utilização dos módulos fotovoltaicos na localidade. Com este trabalho, espera-se que os pesquisadores sejam capazes de compreender o princípio de funcionamento de um sistema fotovoltaico isolado, dos seus equipamentos, bem como aspectos gerais de montagem e segurança do mesmo sistema.

Palavras-chave: efeito fotovoltaico, sistema fotovoltaico isolado.

EXTENDED ABSTRACT

Application of solar energy is current for Africa. Angola already has projects to install the large photovoltaic system (SFV) stations in the south of the country. There are problems with the lack of national staff in these areas. Although the Agostinho Neto University (UAN) still does not have this specialty, the DEI of Physics has started to prepare some specialists in the field of renewable energies.

This work is the result of research by the final year students of the physics course, having participated in the successful implementation of the

1 Ministério do Interior da R. Angola, germanodossantos2000@hotmail.com

2 Universidade Agostinho Neto, Luanda, Angola, psserghei@gmail.com

isolated installation project of SFV with a power of 24 kW, in the Cabo Ledo region (Angola) with Racara-Energias Renováveis. The work presents a study related to the artificial use of solar energy by the photovoltaic effect, including the working principle of an isolated photovoltaic system, main applications, advantages and disadvantages, as well as the general aspect of the assembly and use of the photovoltaic modules in the locality. With this work, it is expected that researchers will be able to understand the principle of operation of an isolated photovoltaic system, its equipment, as well as general aspects of assembly and safety of the same system.

Starting from the current electricity distribution framework that represents one of the main factors for the development of a country, contributing to the improvement of the living conditions of its population and, in Angola, the supply of electricity still has great deficiencies, the production of Electricity over the years has been insufficient to satisfy the needs of consumers, both domestic and industrial. To this end, it was thought to carry out a study and application of isolated photovoltaic systems as alternative sources of energy production, which presents itself as an option to complement the conventional sources of energy production contributing to the increase in the production and consumption of electricity in Angola. This work was chosen with the aim of studying and implementing an isolated photovoltaic system, as an alternative to the conventional means of producing electricity whose constraints are known. The same work allowed us to study and apply an isolated photovoltaic system in Cabo Ledo (Angola). With that, we realized that the use of the energy generated by the Sun is one of the most promising energy alternatives to face the challenges of our country. Based on the study, it was concluded that: The basic unit responsible for converting solar energy into electricity is a voltaic cell, the cells generate electric current from a physical phenomenon called the voltaic effect. The effect occurs through a semiconductor, the most used in the case of the system is silicon. The photovoltaic effect is the direct transformation of solar radiation into electrical energy, using solar cells that are devices responsible for this transformation; a photovoltaic generator has its electrical characteristics basically dependent on the irradiance and temperature in the modules. The isolated photovoltaic system can be applied to water pumping, home, telecommunications and remote monitoring systems, electric fence and street lighting with a pole. For system maintenance we need to inspect the condition of the electrical connections and cables with particular emphasis on those of the photovoltaic module and the battery, check the condition of the photovoltaic module's support structure and its anchorage and do the periodic cleaning of the modules to prevent dirt from accumulating on the its surface.

The dimensioning of a photovoltaic system involves module orientation, area availability, aesthetics, and availability of the solar resource, de-

mand to be met and several other factors. Through dimensioning it is intended to adapt the photovoltaic generator to the needs defined by demand. The studies carried out gave us the possibility to assemble the necessary modules with an effective slope, make the connection between the elements of the system, determine the number of batteries and characterize the parameters of the controller / inverter of the isolated photovoltaic system in Cabo Ledo. The installed photovoltaic generator has 96 photovoltaic panels with faces facing north, has a slope of 15° and a maximum power of 24kW. The installed controller/inverter has a nominal power of 100kW; the battery bank consists of 174 batteries and has a capacity of 3046 Ah and an autonomy of 2 days. According to the measurements made, we found that the photovoltaic generator reached a maximum power of 19.672 kW when it was 1 pm and a minimum power of 5.687 kW when it was 4 pm. The power of the battery bank varied increasingly depending on the hours of the day, reaching a maximum power of 20.931 kW when it was 16h. The use of solar energy by the isolated photovoltaic system applied in Cabo Ledo satisfied the shortage of electricity that existed in that location.

Key-words: photovoltaic effect, isolated photovoltaic system

FÍSICA E ENSINO

Durante o desenvolvimento da nossa sociedade, ficou clara a carência de energia em todos os possíveis locais da convivência humana e o aproveitamento da energia gerada pelo sol é uma das alternativas energéticas mais promissoras para enfrentarmos os desafios do nosso país.

Neste trabalho foi feito um estudo relacionado ao aproveitamento artificial da energia solar pelo efeito fotovoltaico, incluindo o princípio de funcionamento de um sistema fotovoltaico isolado, principais aplicações, vantagens e desvantagens, bem como o aspecto geral da montagem e utilização dos módulos fotovoltaicos na localidade de Cabo Ledo (Angola).

EFEITO FOTOVOLTAICO E CÉLULA FOTOVOLTAICA

O efeito fotovoltaico foi observado pela primeira vez em 1839 por Edmond Becquerel, que verificou que placas metálicas de platina ou prata, mergulhadas num eletrólito, produziam uma pequena diferença de potencial quando expostas à luz (Cooper & Martins Jr., 2013). Portanto, efeito fotovoltaico é a transformação directa da radiação solar em energia eléctrica, recorrendo-se às células solares. Uma célula fotovoltaica como dispositivo responsável pela tal conversão apresenta uma camada fina de material semicondutor (o mais

utilizado é o silício) tipo *n* e outra com maior espessura de material tipo *p*, que cria junção *pn* (Dumba, 2015).

Se uma junção *pn* for exposta a fótons com energia maior que o gap, ocorrerá a geração de pares elétron-lacuna; se isto acontecer na região onde o campo eléctrico é diferente de zero, as cargas serão aceleradas, gerando assim uma corrente através da junção; este deslocamento de cargas dá origem a uma diferença de potencial a qual chamamos de efeito fotovoltaico, associado a uma corrente eléctrica e uma diferença de potencial. (Cooper & Martins Jr., 2013; Souza, 2016).

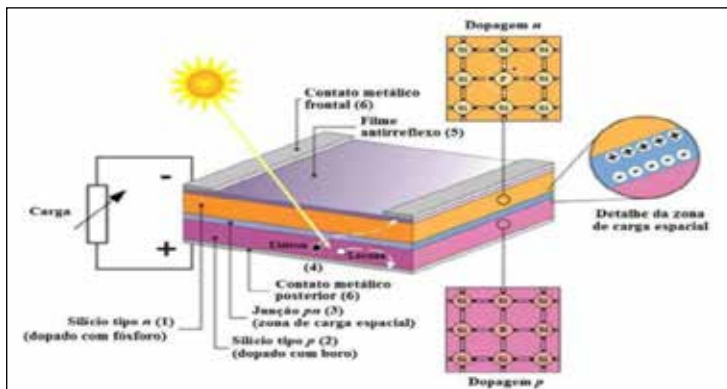


FIGURA 1. Estrutura básica de uma célula fotovoltaica de silício cristalino (Moehlecke & Zanesco, 2005).

Este efeito, na verdade, ocorre em qualquer díodo semiconductor (fotosensível) que for exposto à radiação; portanto, as células fotovoltaicas podem ser entendidas essencialmente como díodos de grande área otimizados para o aproveitamento do efeito fotovoltaico.

Para a célula fotovoltaica é ainda necessário um contacto eléctrico frontal (malha metálica) na região *n*, assim como um contacto na região *p*. Se esses contactos forem conectados externamente por meio de um condutor, haverá uma circulação de electrões. Além do processo de geração de pares de electrão-lacuna, também ocorrem processos de recombinação dos portadores de cargas minoritárias gerados. A recombinação pode ocorrer tanto na superfície quanto no volume do dispositivo (Moehlecke & Zanesco, 2005).

SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

O sistema fotovoltaico é uma fonte de potência eléctrica na qual as células fotovoltaicas transformam a radiação solar directamente em energia eléctrica.



FIGURA 2. Tipos de sistemas fotovoltaicos.

Sistema fotovoltaico isolado: é aquele que não tem contacto com a rede de distribuição de electricidade. Sistema fotovoltaico conectado à rede: é aquele que fornece energia para as redes de distribuição. Todo o potencial gerado é rapidamente escoado para a rede, que age como uma carga, absorvendo a energia (ABNT, 2013b). A utilização de cada uma dessas opções depende da aplicação e/ou da disponibilidade dos recursos energéticos.

COMPONENTES BÁSICOS DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Um sistema fotovoltaico é constituído por um bloco gerador, um bloco de controlo e condicionamento de potência e, opcionalmente, um bloco de armazenamento.

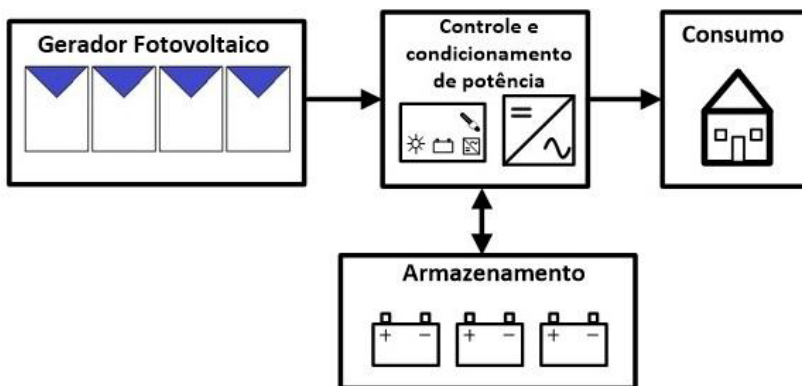


FIGURA 3. Constituição básica de um sistema fotovoltaico (Pinho & Galdino, 2014).

Bloco gerador: contém os arranjos fotovoltaicos, constituídos por módulos fotovoltaicos em diferentes associações, o cabeamento eléctrico que os interliga e a estrutura de suporte.

Um módulo fotovoltaico é composto por células fotovoltaicas conectadas em arranjos para produzir tensão e correntes suficientes para a utilização prática da energia, ao mesmo tempo em que promove a protecção das células (Inmetro, 2011).



FIGURA 4. Módulos FV de silício monocristalino (Dumba, 2015).

Bloco de condicionamento de potência: pode ter controladores de carga (se houver armazenamento), inversores e outros dispositivos de protecção, supervisão e controle.

Bloco de armazenamento: as baterias electroquímicas ainda são mais utilizadas em sistemas fotovoltaicos isolados, por ser uma forma conveniente e eficiente de armazenamento de energia eléctrica. (Galdino, Borba & Almeida, 2010).

APLICAÇÕES DO SFV ISOLADO

O sistema fotovoltaico isolado pode ser aplicado em diversas áreas, tais como: sistemas de bombeamento de água, sistemas domiciliares, sistemas de telecomunicações e monitoramento remoto, cerca eléctrica e sistemas de iluminação pública com poste (ABNT, 2007).

APLICAÇÃO PARA SISTEMAS DE BOMBEAMENTO DE ÁGUA

Um sistema fotovoltaico de bombeamento (SBFV) é constituído por gerador fotovoltaico, um dispositivo de condicionamento de potência (inversor, controlador de bomba), um conjunto motobomba e um reservatório de água, conforme ilustra a Figura 5. Diferentemente dos sistemas domiciliares de geração de energia eléctrica, geralmente nos sistemas de bombeamento de água não são utilizadas baterias para o armazenamento de energia, com excepção aos casos em que a bomba é uma carga a mais de um SFVI convencional (com baterias). Como

regra geral, a água é bombeada e armazenada em reservatórios, para sua posterior utilização (Fedrizzi, 2003).

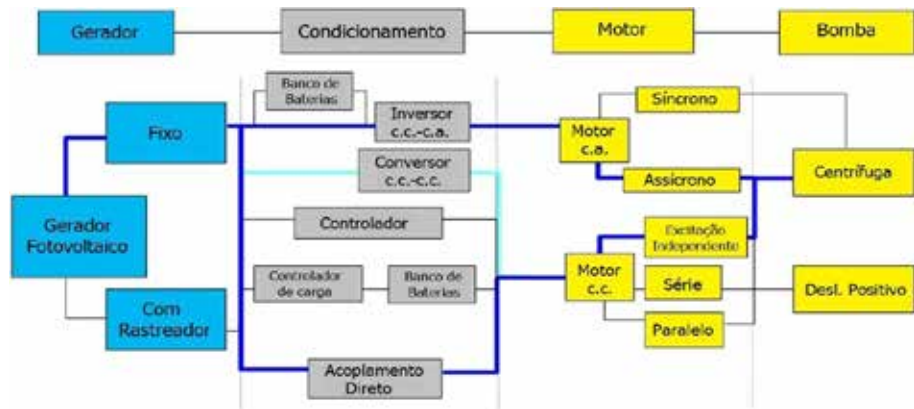


FIGURA 5. Configurações utilizadas para sistemas de bombeamento fotovoltaico (Koner, 1993).

APLICAÇÃO PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DOMICILIARES

A eletrificação com Sistemas Fotovoltaicos Domiciliares (SFD) consiste no atendimento, mediante energia solar, de domicílios individuais, permitindo aos moradores beneficiados ampliar seu leque de atividades, incluindo educação, lazer e produção, dentre outras. Os elementos fundamentais que caracterizam um SFD são a própria carga e o gerador fotovoltaico. Em geral, um sistema tão simples somente permitiria consumos proporcionais à radiação solar, isto é, durante as horas do dia e especialmente em dias ensolarados.

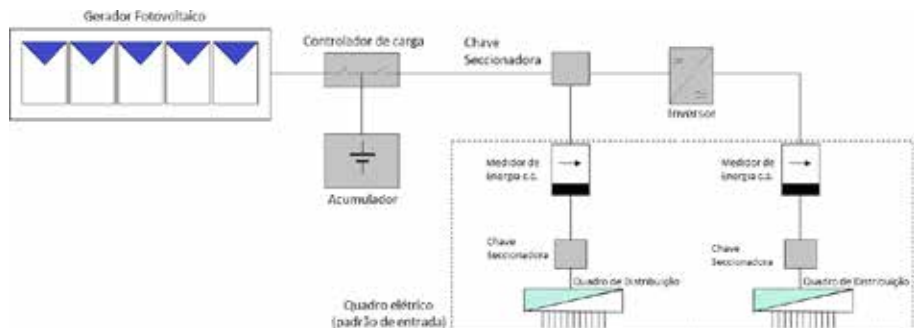


FIGURA 6. Esquema unifilar de SFD com atendimento c.c. e c.a. (Pinho & Galdino, 2014).

APLICAÇÃO PARA SISTEMAS DE TELECOMUNICAÇÕES E MONITORAMENTO REMOTO

Desde o início de suas aplicações terrestres, os SFV são usados para fornecer energia para a área de telecomunicações, devido à sua simplicidade e reduzida manutenção. A confiabilidade das fontes de energia para a maioria das aplicações nesta área deve ser bastante alta. Geralmente, esses sistemas necessitam de baixa potência e são instalados em áreas remotas, com acesso limitado.



FIGURA 7. Sistema isolado com armazenamento eléctrico.

APLICAÇÃO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO PARA CERCA ELÉCTRICA

Nas áreas rurais, é comum o uso de cercas eléctricas para protecção de propriedades ou para contenção de animais na criação de bovinos ou caprinos. No confinamento de animais, a cerca eléctrica pode representar vantagens económicas em relação à cerca convencional, incluindo menor custo de material (arames, mourões) e de mão de obra, além de demandar menos tempo de construção.

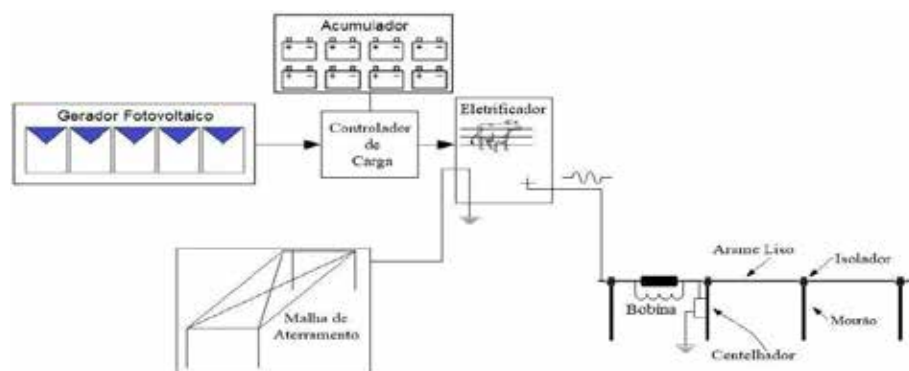


FIGURA 8. Diagrama genérico para cerca eléctrica com alimentação fotovoltaica (Sustentabilidades..., 2018).

APLICAÇÃO PARA SISTEMA DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA COM POSTE

Os sistemas de energia fotovoltaica movidos a luz solar podem ser uma alternativa com boa relação custo-benefício e mínima manutenção para gestão de postes de iluminação pública.

O sistema de iluminação pública fotovoltaica é composto, no mínimo, por quatro itens: módulo solar, controlador de carga, bateria (de preferência, com vida útil superior a quatro anos) e inversor, além, obviamente, do poste, geralmente fabricado em concreto ou ferro galvanizado, para protecção dos agentes atmosféricos.

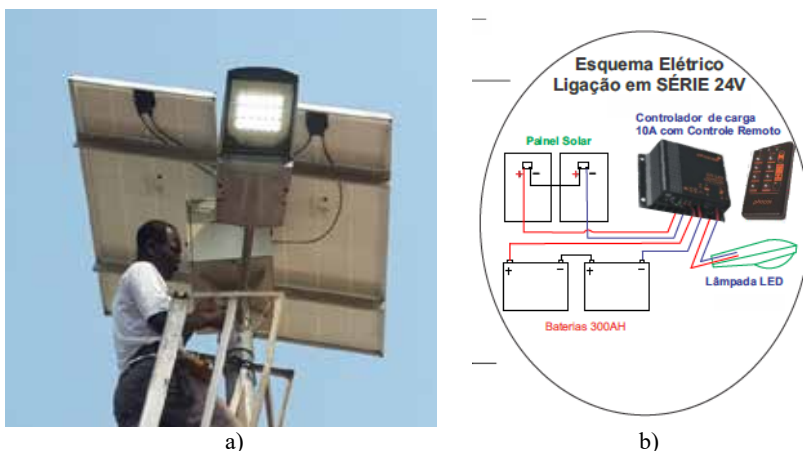


FIGURA 9. Aplicação do sistema isolado com armazenamento eléctrico para iluminação solar pública com poste: (a) poste de iluminação em Cabo Ledo (Angola), (b) Esquema eléctrico do sistema FV de iluminação pública

VANTAGENS E DESVANTAGENS DO SFV

Vantagens principais do sistema fotovoltaico: vida útil dos módulos fotovoltaicos que é de pelo menos 25 anos; baixo custo de manutenção; ausência de custos com o combustível.

Desvantagens principais do sistema fotovoltaico: o custo e a complexidade dos sistemas fotovoltaicos, que necessitam de baterias para armazenar energia; disponibilidade da radiação solar.

MANUTENÇÃO

Algumas manutenções requeridas no sistema fotovoltaico a considerar são as seguintes: limpeza periódica dos módulos; inspeção das ligações; verificação do estado da estrutura.

REALIZAÇÃO DO PROJETO DO SFV ISOLADO

Tendo em conta as principais fases de um projecto fotovoltaico, foram realizadas as seguintes etapas:

AValiação DO RECURSO SOLAR

A partir do *software* Solar radiation finder, obtivemos os valores médios mensais de radiações solares da localidade de Cabo Ledo, como podemos ver na Figura 10.

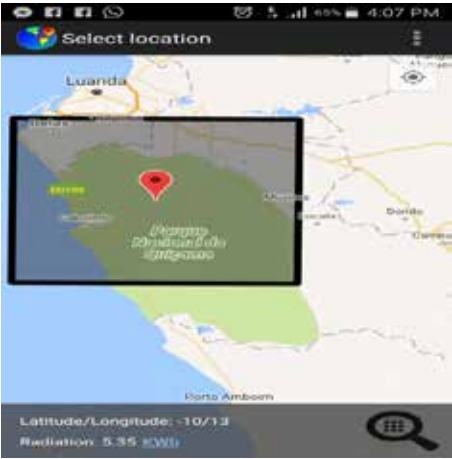


FIGURA 10. Localização da localidade de Cabo Ledo em Angola, software Solar radiation finder.

ÍNDICE DE IRRADIAÇÃO SOLAR POR DIA, NOS RESPECTIVOS MESES

TABELA 1. Irradiância Solar – Médias mensais da região de Cabo Ledo.

Mês	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Maio	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
I(0) [Wh/m²/dia]	6060	6040	5530	5380	5460	4910	4560	4710	5120	5080	5600	5700

CÁLCULO DAS HORAS DE SOL PICO NA LOCALIDADE DE CABO LEDO

$$HSP_{de\ Cabo\ Ledo} = \frac{I(0)}{G} = \frac{5,35 \frac{kWh}{m^2} / dia}{1 kW / m^2} = 5,35 h / dia$$

ORIENTAÇÃO E INCLINAÇÃO DO GERADOR FOTOVOLTAICO

Orientação: como o gerador fotovoltaico instalado em Cabo Ledo está localizado no hemisfério Sul, a face dos módulos fotovoltaicos foi orientada em direção ao Norte.

Inclinação: Tendo em conta a latitude da localidade de Cabo Ledo, de -10° , foi dada uma inclinação de 15° por questão de autolimpeza (ver Figura 11).



FIGURA 11. Localização do gerador fotovoltaico, sua inclinação e orientação.

LEVANTAMENTO DA DEMANDA E DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA

TABELA 2. Dados da quantidade, potências e tempos de funcionamento dos equipamentos a alimentar.

Nº	Aparelhos Electrónicos	Qtde	P(W)	Horas de Utilização h/dias	Consumo (KWh/dia)
1	Ar condicionados	5	1450	4	29
2	Computadores	4	63	4	1,008
3	Impressoras Jato	2	50	4	0,4
4	Frigonífico de 2 portas	3	67	24	4,824
5	Máquina de Lavar	2	900	1	1,8
6	Ventilador de teto	5	120	4	2,4
7	Rádio Elétrico pequeno	3	10	2	0,06
8	Lâmpadas fluorescente	20	15	4	1,2
9	Modem de Internet	1	8	3	0,024
10	TV em cores – 42" (LED)	3	203	4	2,436
11	Box Zap	1	24	4	0,096
12	Ferro Elétrico	3	4	750	9
13	Equipamento de Recepção VSAT	1	12	5	0,06
14	Equipamento de rádio Receptor Tx	1	12	5	0,06
15	Equipamento de rádio Transmissão	1	12	5	0,06
16	Morgue 24 Gavetas	1	2236,8	24	53,6832
17	Telefone sem fios	1	3	1	0,003
18	Monitor	1	55	1	0,055
Total			3,867		106,1692

$$E_{Geração} = \sum_{i=1}^n P_i \times t_i = 106 \text{ kWh} / \text{dia}$$

DIMENSIONAMENTO DO GERADOR FOTOVOLTAICO

Tendo em conta a demanda a atender, foi escolhido o painel de Silício policristalino com as características apresentadas na tabela 3.

TABELA 3. Características do módulo fotovoltaico escolhido.

Potência nominal máxima (W)	Tensão do circuito aberto (V)	Tensão nominal (V)	Corrente nominal (A)	Corrente de curto circuito (A)
260	38,40	31,40	8,94	8,37

Cálculo da potência total dos painéis (kW)

$$P_{Total \text{ dos painéis}} = \frac{E_{Geração}}{t_{Exposição} \times \eta_{Rendimento}} = \frac{106 \text{ kWh} / \text{dia}}{5,3 \text{ h} / \text{dia} \times 0,8} = 25 \text{ kW}$$

Cálculo da quantidade de painéis

$$Qtd_{Painéis} = \frac{P_{Total \text{ dos painéis}}}{P_{Painéis}} = \frac{25000 \text{ W}}{260 \text{ W}} = 96,2 \text{ Unidades} \approx 96 \text{ Unidades}$$

Após obtermos o valor exacto de painéis necessários, há necessidade de recalcular a potência com o número exacto de painéis:

$$P_{Total \text{ dos painéis}} = Qtd_{Painéis} \times P_{painel}$$

$$P_{Total \text{ dos painéis}} = 96 \text{ Unidades} \times 260 \text{ W} = 24960 \text{ W} = 24,960 \text{ kW}$$

DIMENSIONAMENTO DOS EQUIPAMENTOS DE CONDICIONAMENTO DE POTÊNCIA

Dimensionamento do controlador/inversor:

Entrada CC	Saída CA
Tensão máxima de entrada – 800V	Potência Nominal – 100 kW
Corrente máxima de entrada – 250 A	Tensão nominal – 380/400 V
	Corrente máxima por fase – 150 A
	Frequência Nominal - 50/60Hz
BATERIA CC	
Tensão Nominal – 350 V	
Corrente de carga máxima – 300 A	
Faixa de Temperatura de funcionamento	
-10°/50°C	



FIGURA 12. Controlador/inversor off Grid - Zigor Solar HIT3C 100 Plus
escolhido e suas características.

DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE ARMAZENAMENTO

Para o dimensionamento considerou-se os parâmetros da tabela 4.

TABELA 4. Parâmetros do banco de baterias.

Valores	Parâmetro
106121	Consumo diário de energia (Wh/dia)
174	Tensão de barramento CC (V)
2	Autonomia desejada (dias)
50	Máxima profundidade de descarga (%)
20	Máxima profundidade de descarga diária (%)

Cálculo da capacidade do banco de bateria diário:

$$CB = \frac{E_{Geração}}{V_{Sist}} = \frac{106121 Wh / dia}{174 V} = 609,89 Ah / dia$$

Cálculo da capacidade preliminar do banco de bateria não ajustado ao factor de máxima profundidade de descarga:

$$CB_a = CB \times N = 609,89 \frac{Ah}{dia} \times 2 dias = 1219,78 Ah$$

Ajuste da capacidade CB_a pelo factor de máxima profundidade de descarga:

$$CB_{Pd} = \frac{CB_a}{P_{ds}} = \frac{1219,78 Ah}{0,5} = 2439,56 Ah$$

Capacidade do banco de bateria ajustada em função da máxima profundidade de descarga diária:

$$CB_{Pdd} = \frac{CB}{P_{dd}} = \frac{609,89 Ah / dia}{0,2} = 3049,45 Ah / dia$$

Como a CB_{Pdd} é maior que CB_{Pd} , escolhemos CB_{Pdd} para o cálculo do conjunto de baterias em paralelo e em série:

$$CB_{Pdd} = 3049,45 Ah / dia$$

Tendo em conta a capacidade do Banco de bateria necessário para atender a demanda, foi comprada a bateria 12 OPzV 1500 com as seguintes características:

- Tensão nominal da bateria (V) = 2 V
- Tensão de flutuação = 2,25 V/Cell



FIGURA 13. Características da bateria 12 OPzV solar power 1500.
1364 Ah C₁₀ / 1695 Ah C₁₀₀. U_{Float} = 2,25 V/cell.

Calculamos então o número de conjuntos de baterias ligados em paralelo e em série pelas fórmulas:

$$N^{\circ} \text{ Baterias em paralelo} = \frac{CB_{pd}}{CB_{bat}} = \frac{3049,45 \text{ Ah / dia}}{1364 \text{ Ah}} = 2,2 \approx 2$$

$$N^{\circ} \text{ Baterias em série} = \frac{V_{Sist}}{V_{bat}} = \frac{174 \text{ V}}{2 \text{ V}} = 87$$

MONTAGEM DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

A estrutura de suporte dos módulos fotovoltaicos tem como função posicioná-los de maneira estável. Além disso, ela deve assegurar a ventilação adequada, permitindo dissipar o calor que normalmente é produzido devido à ação dos raios solares e ao processo de perdas na conversão de energia. Isto é importante porque a eficiência dos módulos diminui com a elevação da temperatura, podendo até comprometer seu funcionamento normal. Deve ainda possibilitar o distanciamento entre módulos, conforme indicação do fabricante, para evitar danos mecânicos aos mesmos conforme sua dilatação.

1º Passo: montagem da estrutura de suporte dos módulos



FIGURA 14. Montagem da estrutura de sustentação dos módulos fotovoltaicos e ligação dos módulos.

2º Passo: ligação dos módulos e dos equipamentos de condicionamento de potência



FIGURA 15. Conclusão da montagem da estrutura de sustentação dos módulos fotovoltaicos.



FIGURA 16. String Box – Caixa de conexões que possui fusíveis de protecção, concentra os cabos eléctricos dos conjuntos de 16 módulos fotovoltaicos ligados em série.

3º Passo: ligação dos módulos e dos equipamentos de condicionamento de potência



FIGURA 17. (a) Quadro de protecção de corrente (CC): é o quadro que incorpora o primeiro quadro de protecção de corrente (CC) e adiciona uma chave de desconexão do banco de bateria, um dispositivo de protecção contra surtos (DPS), (b) Controlador /inversor off Grid - Zigor Solar HIT3C 100 Plus.

4º Passo: compartimento das baterias

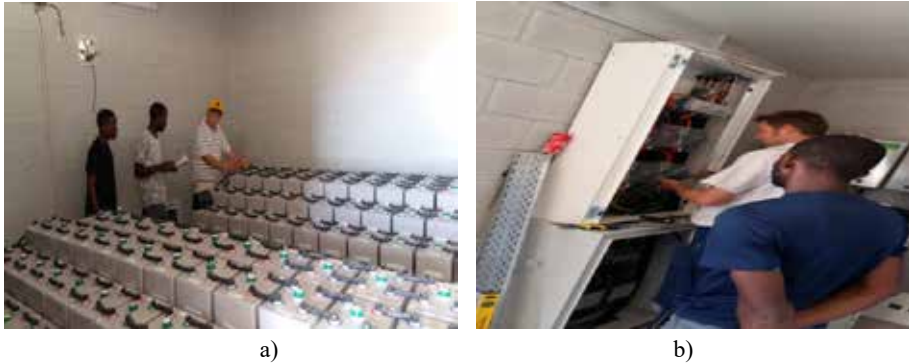


FIGURA 18. a) Banco de bateria e seu sistema de circulação de ar.
b) Quadro de protecção de corrente alterna (CA): faz a conexão entre o inversor do Sistema Fotovoltaico e a rede eléctrica.

MEDIDAS E ANÁLISE DOS RESULTADOS

DADOS OBTIDOS NAS MEDIÇÕES

TABELA 5. Valores médios de tensão, corrente e potência do sistema e do banco de bateria

Horas	Corrente produzida pelo Sistema FV, (A)	Tensão nos terminais do sistema FV (V)	Corrente no Banco de bateria, (A)	Tensão no Banco de bateria, (V)	Potência do Sistema FV, (kW)	Potência do Banco de Bateria, (kW)
11h00	27,41	368,1	10,01	243,0	10,089	2,432
12h00	40,18	489,6	10,80	506,0	19,672	5,464
13h00	39,84	488,1	27,41	368,6	19,445	10,103
14h00	34,21	489,6	31,03	382,6	16,729	11,872
15h00	18,50	552,0	43,55	375,0	10,212	16,331
16h00	11,0	517,0	51,05	410,0	5,687	20,931

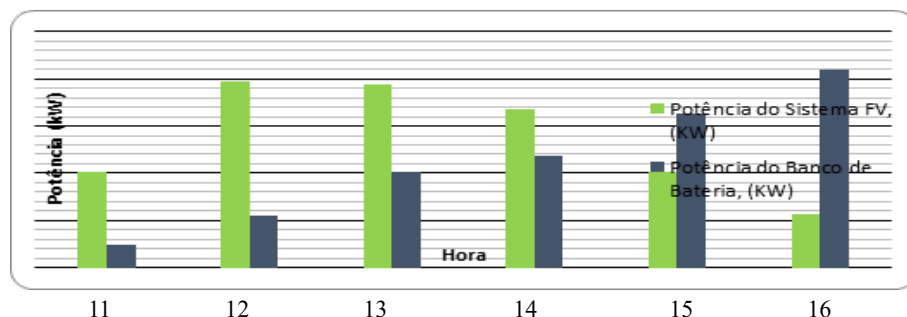


FIGURA 19. Gráfico da potência do gerador fotovoltaico e do banco de bateria em função da hora.

ANÁLISE DOS RESULTADOS

A análise feita nos deu a possibilidade de fazer a montagem dos módulos necessários com uma inclinação efectiva, realizar a ligação entre os elementos do sistema, determinar o número de baterias e caracterizar os parâmetros do controlador/inversor do sistema fotovoltaico isolado na localidade de Cabo Ledo.

O gerador fotovoltaico instalado possui 96 painéis fotovoltaicos com faces viradas ao norte, tem uma inclinação de 15° e uma potência máxima de 24kW. O controlador/inversor instalado tem uma potência nominal de 100kW. O banco de baterias é constituído por 174 baterias e tem uma capacidade de 3.046 Ah e uma autonomia de 2 dias.

De acordo com as medições feitas, constatamos que o gerador fotovoltaico atingiu a potência máxima de 19,67 kW quando eram 13h e uma potência mínima de 5,69 kW quando eram 16h. A potência do banco de bateria variava de forma crescente em função das horas do dia, atingindo a potência máxima de 20,9 kW quando eram 16h.

O aproveitamento da energia solar pelo sistema fotovoltaico isolado aplicado na localidade de Cabo Ledo satisfaz a carência de energia eléctrica que existia na referida localidade.

REFERÊNCIAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1998). *NBR 14197*. Acumulador chumbo-ácido estacionário ventilado – Especificações.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2007). *NBR IEC 60335-2-76*. Aparelhos Eletrodomésticos e Aparelhos Elétricos Similares – Segurança – Parte 2-76: Requisitos para Eletrificadores de Cerca.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2013a). *NBR 10899*. Energia solar fotovoltaica – Terminologia. Segunda edição.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2013b). *NBR 16149*. Sistemas Fotovoltaicos (FV) – Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição. Primeira edição.
- ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. (2012). *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – Prodist*; Módulo 3 – Acesso ao Sistema de Distribuição. Revisão 5.
- Bento, T. (2011). *Prática de energia solar fotovoltaica*. 1. ed. Porto: Pulindústria Edições Técnicas.
- Cooper, E., & Martins Jr., W. M. (2013). *Aplicação de painéis solares fotovoltaicos como fonte geradora complementar de energia elétrica em residências*. [Trabalho de conclusão de curso não publicado]. Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- Couto, M. B. (2000). *Ensaio de equipamentos de consumo típicos utilizados em sistemas fotovoltaicos*. [Dissertação de Mestrado não publicada]. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil. 96 p.
- CSR energia solar – Sistemas autônomos com armazenamento. Disponível em: <http://www.csrenergiasolar.com.br/sistemas-fotovoltaicos/>. Acesso em: 12 out. 2018.
- Dumba, D. E. (2015). *Energia Solar Fotovoltaica como fonte alternativa de produção de energia elétrica em Angola*. [Tese não publicada]. ISEP – Instituto Superior de Engenharia do Porto, Portugal. <http://hdl.handle.net/10400.22/7987>
- Exide technologies. (2003). *Industrial Energy*. Handbook for Gel-VRLA-Batteries. Technical Support, Rev. 1.
- Fedrizzi, M. C. (2003). *Sistemas fotovoltaicos de abastecimento de água para uso comunitário: lições apreendidas e procedimentos para potencializar sua difusão*. [Tese de Doutorado não publicada]. Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Fraidenraich, N. (2002). *Abastecimento de água em áreas rurais mediante bombeamento fotovoltaico*. Projecto PIPVI.5 CITED. [Apresentação em Conferência]. VIII Seminário Ibero-Americano de Energia Solar: Abastecimento de Água em Áreas Rurais Mediante Bombeamento fotovoltaico. Recife, Brasil.
- Galdino, M. A., Borba, A. J. V., & Almeida, V. M. de. (2010). *Avaliação de material do MME/Prodeem armazenado no almoxarifado da Chesf em Abreu e Lima-PE*. Relatório Técnico Cepel DTE 14494/2010.

IEE USP - Instituto de Energia e Ambiente. *Sistemas fotovoltaicos conectados à rede*. Disponível em: <http://www.iee.usp.br/sistemas-fotovoltaicos-conetados-a-rede>. Acesso em: 11 out. 2018.

Imamura, M. S., Helm, P., & Palz, W. (1992). *Photovoltaic system technology: A European handbook*, 1st ed. Taylor & Francis. 566 p.

INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia. (2011). Normalização e Qualidade Industrial - Inmetro. *Portaria nº 004*. Anexo – Requisitos de Avaliação da Conformidade para Sistemas e Equipamentos para Energia Fotovoltaica (Módulo, Controlador de Carga, Inversor e Bateria). Brasília, Brasil.

Koner, P. K. (1993). A review on the diversity of photovoltaic water pumping systems. *NERIC International Energy Journal*, 15(2).

Lorenzo, E., Saura, F. P., Fernández, L. N., Fedrizzi, M. C., Zilles, R., Aandam, M., & Zaoui, S. (2005). Boas práticas na implantação de sistemas de bombeamento fotovoltaico. [Tese não publicada] Instituto de Energia Solar, Universidade Politécnica de Madrid, Espanha.

Moehlecke, A., & Zanesco, I. (2005). Mercado, física e processamento de células solares. *Metalurgia e Materiais*, 61(557), 394-397.

Pinho, J. T., Barbosa, C. F. O., Pereira, E. J. S., Souza, H. M. S., Blasques, L. C. M., Galhardo, M. A. B., & Macêdo, W. N. (2008). *Sistemas híbridos: soluções energéticas para a Amazônia*. 1. ed. Brasília, Brasil: Ministério de Minas e Energia. 396 p.

Pinho, J. T., & Galdino, M. A. (2014). *Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos*. Ed. revista e atualizada. Rio de Janeiro.

Sistema fotovoltaico | sun rio – Sistemas autônomos sem armazenamento. Disponível em: <https://sunrioenergiasolar.com.br/sistema-fotovoltaicos/>. Acesso em: 4 out. 2018.

Soares, G. F. W., Vieira, L. S. R., Galdino, M. A., & Oliveri, M. M. A. (2012). Sistemas de Potência. *Eletroevolução*, 66, 62-68. ISSN 1806-1877.

Soares, G. F. W.; Vieira, L. S. R.; Galdino, M. A., & Lopes, F. C. (2011). *Análise de baterias de íon-lítio para Sistemas de Geração Suprindo Pequenas Comunidades Isoladas*. [Apresentação em Conferência]. XXI SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Florianópolis-SC.

Souza, J. R. P. S. (2016). *Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações para o Ensino Médio*. [Dissertação não publicada]. Universidade Federal do Pará, Belém-Pará.

Sustentabilidades energéticas solar, termo-solar e eólica – Sistema fotovoltaico híbrido. Disponível em: <http://solventoenergia.blogspot.com>. Acesso em: 12 out. 2018.

Tiba, C., Fraidenraich, N., & Barbosa, E. M. de S. (1998). *Instalação de sistemas fotovoltaico para residências rurais e bombeamento de água*. Texto para curso de instalador de sistema fotovoltaico. Versão 2.0.

O LIVRO DIDÁTICO DE FÍSICA E DE CIÊNCIAS COMO OBJETO DE INVESTIGAÇÃO*

THE TEXTBOOK OF PHYSICS AND SCIENCE AS AN OBJECT OF INVESTIGATION

Nilson Marcos Dias Garcia¹

RESUMO

Apresenta resultados de pesquisas que tomaram diversos aspectos relativos aos livros didáticos de Física e de Ciências como objeto de investigação e que foram desenvolvidas por professores e alunos vinculados ao Programa de Pós-Graduação em Educação – PPGE – e ao Núcleo de Pesquisas em Publicações Didáticas – NPPD – da Universidade Federal do Paraná – UFPR, e ao Programa de Pós-Graduação em Formação Científica, Educacional e Tecnológica – PPGFCET – e ao Grupo de Estudos e Pesquisas em Ensino de Física – GEPEF, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Realizadas a partir do ano de 2006, detalhes e resultados dessas investigações têm sido apresentados em dissertações, teses, artigos em periódicos e em eventos, e foram disponibilizados em livro publicado em 2017. Dadas as diversas abordagens, os objetos dessas investigações foram categorizados segundo a relação estabelecida entre os livros didáticos e a formação de professores; o estudo de conteúdos e temáticas neles abordadas; os critérios de escolha e as estratégias de seu uso; a presença e o papel desempenhado pelos recursos digitais neles incorporados; as múltiplas e mútuas influências exercidas pela cultura local no seu uso por professores e alunos, assim como elementos mercadológicos do livro didático. A análise da natureza das pesquisas e de seus resultados mostrou haver, nesse período, uma crescente articulação entre as temáticas investigadas, por meio da qual foram se estabelecendo relações cada vez mais complexas entre os estudos relativos aos livros didáticos de Física e de Ciências e outros elementos nos quais esses artefatos da cultura escolar se inserem.

Palavras-chave: Livro didático de Física, Livro didático de Ciências, Pesquisas sobre Livro Didático, Produção acadêmica; PNLD.

EXTENDED ABSTRACT

INTRODUCTION

This paper presents an overview of the research studies conducted on natural science textbooks (Physics and Sciences) by researchers from the

* O presente texto constitui uma versão simplificada, em português, do texto “Research on Natural Sciences textbooks in Brazil”, originalmente publicado pelo autor, em 2019, em inglês, no livro *IARTEM 1991-2016, 25 Years developing textbook and educational media research*, pela Andavira Editora, S. L.

¹ UTFPR – PPGTE/GEPEF/GETET e UFPR – PPGE/NPPD, nilson@utfpr.edu.br e nilsondg@gmail.com

Federal University of Paraná, Brazil (UFPR) and the Technological Federal University of Paraná, Brazil (UTFPR) over the course of a decade.

Introducing the problem, it should be registered initially that the use, authorship and production of textbooks in Brazil occurred more intensely only about three centuries after the arrival of the Portuguese colonizers. This situation was generated by the fact that the option of mercantile colonization applied by Portugal did not allow schools to develop in the Colony, and consequently the non-use of textbooks. This panorama only changed in 1808, when, fleeing Napoleon's invasion of Portugal, the Portuguese royal family settled in Rio de Janeiro. As a result, it was necessary to create conditions for their stay in the Colony, here including the creation and construction of schools with the consequent use of textbooks.

Despite this late introduction of textbooks into the Brazilian educational landscape, the initial setback began to be overcome through a concerted government effort in 1937, when Brazil launched a "program for the distribution of didactic volumes to students of the public education system". Such a government initiative would culminate, after successive transformations and improvements, in the creation, in the 1990s, of the National Textbook Program - PNLD, which would become one of the largest textbook distribution programs in the world.

THE FIRST PHYSICS TEXTBOOKS PRESENT IN BRAZILIAN SCHOOLS

The first textbooks on Physics and Sciences used in Brazilian schools in the first half of the 20th century, according to Lorenz (2008), were mostly by French authors and even the few written by Brazilians had the French compendiums as a model. This French dependence would only come to an end at the middle of that century, when, due to American educational reforms and the projects developed in that country, Brazilian textbooks began to suffer North American influence, sustained, in several aspects, by the MEC-USAID agreements.

However, even under the influence of American texts, from the 1960s on, the national production and authorship of textbooks intensified, so that from that moment on, the authorship, production and the national publishing market suffered a great increase.

BRAZILIAN RESEARCH ON PHYSICS AND SCIENCES TEXTBOOKS

According to Alain Choppin, textbooks have started to garner a great interest among researchers from various countries in the last thirty years following a long period of neglect by historians and bibliophiles (Choppin, 2004, 549).

Within the Brazilian context, Tânia Braga Garcia (2017) points out that researchers began to focus on the fact that textbooks mainly appear in the school environment and classrooms. As a result, the role textbooks play in school life – as well as their interaction with teachers and students – became both interesting and necessary topics of research, besides those focusing solely on textbooks themselves as objects of study (Garcia, T., 2017).

As for the most recent tendencies, the traditional research on Sciences textbooks used in elementary school and distributed within the scope of the PNLD for over three decades has rested mainly on the second approach, which focuses on the textbook as the object of inquiry. Thus, scientific publications presenting research focused on textbook contents have been recurrent, as well as research stressing the continuation of conceptual misunderstandings and other elements that can be verified by examining the contents. Only recently has there been an interest in the actual use of these textbooks in the classroom, trend that has strongly directed the research conducted in the NPPD.

THE RESEARCH ON TEXTBOOKS UNDER THE PPGE OF UFPR

The ‘Culture, School and Formative Processes in Education’ research Line is a part of the Postgraduate Program in Education at the Federal University of Paraná – PPGE-UFPR, a highly respected postgraduate program in Brazil.

Also included within the scope of the PPGE-UFPR and linked to the ‘Culture, School and Formative Processes in Education’ research Line are the ‘Didactic, School Practices and Didactic Publications’ research group (created in 2001), and the so-called ‘Research Group for Didactic Publications’ (NPPD-UFPR) – both under the supervision of Professor Tânia Maria F. Braga Garcia. As described on its website, the NPPD was created in 2002 with “didactic manuals and other publications aimed at schools, teachers and students as its object of research”, constituting an overarching theme for their activities.

One of the research strands at the NPPD which has grown in scope is the research focused on the diverse aspects concerning Physics and Sciences textbooks, especially after I started my activities in the UFPR’s Postgraduate Program in Education in 2002, as well as my participation in the NPPD. Although having originally developed my teaching and research activities in the Technological Federal University of Paraná – UTFPR, the activities of the Research and Studies Group on Physics Teaching – GEPEF, of which I am one of the leaders, started to couple with the activities of the NPPD. This resulted in a significant amount of research performed by research assistants, undergrad, Masters and PhD students, especially since 2007, which had the complex relationships between Physics and General Sciences textbooks and several school agents as its object of study.

The researches produced under the NPPD group has been presented at events in the field of Physics and Sciences teaching or published in journals and were categorized according to the most evident tendencies in each study. The foci can be illustrated as follows:

- The textbook as a cultural product and as merchandise;
- The relationship between school manuals and the process of teachers' formation;
- Research on the specific contents and themes of textbooks;
- Processes of textbook analysis, selection and usage;
- School manuals and digital resources;
- Review studies.

CONCLUSIONS

In presenting the set of texts that, in effect, represent a decade's worth of research production, and which were recently grouped together in the publication "The physics and sciences textbook in focus: ten years of research" (Garcia, N., 2017a), our attempt is to illustrate the efforts of the research group to draw out and highlight the relationship between the textbook and elements of society and culture, using the activities developed in school as their reference.

In this sense, the research corroborates results presented by Garcia (2012), when stating that "various dimensions of the school experience are affected by the presence of books in the classrooms: including, among other things, teaching methods, assessment, the image of teachers, and knowledge" (Garcia, 2012). It thereby reinforces the importance of policies, practices and training of teachers to fully consider and include proposals for the discussion of topics addressing textbooks within the scope of their diverse and complex relationship with the school environment.

Key-words: Textbook Physics, Textbook Sciences, Textbook Research, Academic Production, PNLD.

INTRODUÇÃO – UM POUCO DA HISTÓRIA DO LIVRO DIDÁTICO NO BRASIL

Apesar da produção em larga escala de material impresso ter ocorrido após o desenvolvimento da prensa de tipos móveis por Gutenberg, a presença do livro didático no Brasil só foi ocorrer nos meados do século XIX.

Essa situação se verificou por conta da natureza da colonização brasileira pelos portugueses que, contrariamente ao ocorrido em outros países da América do Sul, cujos colonizadores optaram por uma colonização de povoamento, priorizaram uma colonização de exploração mercantil (Bresser-Pereira

ra, 2015, p. 36). Essa opção, por não prover a Colônia, dentre outros aspectos, de equipamentos sociais, como escolas e universidades, não criou um mercado consumidor interno em diversos segmentos, inclusive o de livros, mesmo porque, nesse período, na Colônia brasileira estavam proibidas as gráficas.

Em 1808, fugindo da invasão de Napoleão, a corte portuguesa se viu obrigada a se transferir para o Brasil. Assim, significativa mudança ocorreu na Colônia. De um momento para outro, a cidade do Rio de Janeiro, onde se instalou a família real, se viu obrigada a se remodelar para atender sua nova situação política frente ao Reino Português.

Além das mudanças necessárias na cidade, os primeiros cursos superiores foram então criados e a imprensa foi liberada, o que permitiu que o mercado editorial brasileiro passasse a existir. No tocante ao livro didático, a criação, em 1837, do Colégio Pedro II², no Rio de Janeiro, segundo Hallewell (2005, p. 237), pode ser considerada o marco inicial da sua história no Brasil.

Esse atraso na introdução dos livros didáticos no panorama educacional brasileiro, entretanto, começou a ser superado em 1937, quando no Brasil passou a ser mantido, de acordo com o *site* do Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação – FNDE³ – um “programa voltado à distribuição de obras didáticas aos estudantes da rede pública de ensino”. Ainda de acordo com esse *site*, “ao longo desses 80 anos, o programa foi aperfeiçoado e teve diferentes nomes e formas de execução”, sendo atualmente denominado de Programa Nacional do Livro Didático e do Material Didático – PNLD – e se tornado um dos maiores programas de avaliação e distribuição de livros didáticos do mundo, atendendo a alunos e professores da Educação Infantil, do Ensino Fundamental e do Ensino Médio.

O LIVRO DIDÁTICO BRASILEIRO DE FÍSICA E DE CIÊNCIAS COMO OBJETO DE INVESTIGAÇÃO

O livro didático de Física e de Ciências brasileiro, da mesma forma que os demais, só passou a estar presente no cotidiano escolar após a chegada da corte portuguesa ao Brasil. Lorenz (2008), ao pesquisar os programas oficiais dos cursos ministrados no Colégio Pedro II, constatou que a maioria dos primeiros livros dessa disciplina utilizados no Colégio eram franceses ou traduzidos de originais franceses.

² O Colégio Pedro II foi fundado em 2 de dezembro de 1837, sendo uma das mais tradicionais instituições públicas de ensino básico do Brasil. Por muito tempo ele foi tomado como referência para as demais instituições de ensino no Brasil. Sua história pode ser acessada em https://www.cp2.g12.br/historia_cp2.html

³ Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação – FNDE. <http://www.fnde.gov.br/component/k2/item/518-hist%C3%B3rico>

Essa tendência declinou no início do século XX, de forma que na metade daquele século tais livros já eram, em sua quase totalidade, escritos, elaborados e produzidos aqui no Brasil. A partir da segunda metade do século XX, porém, a produção nacional desses livros, apesar de a autoria ser nacional, passou a sofrer forte influência norte-americana, notadamente por conta dos diversos projetos de ensino que estavam sendo elaborados naquele país, principalmente até o final da década de 1970.

Entretanto, a produção editorial brasileira, nesse período, já era robusta. Os livros didáticos de Física e de Ciências já eram escritos por autores brasileiros e produzidos por editoras nacionais. Wagner Wuo (2000), ao analisar 24 livros de Física produzidos no período de 1980 a 2000, verificou que eles foram elaborados já com a intenção de atender às diversidades e aos contextos da educação nacional.

Como em outros países, conforme apontado por Choppin (2004), no Brasil a preocupação investigativa a respeito dos livros didáticos só começou a tomar corpo a partir da década de 1990 (Choppin, 2004, p. 549).

Pela forte presença do livro didático no ambiente escolar e nas salas de aula propiciada pela distribuição dos mesmos no âmbito do PNLD, passou a haver interesse acadêmico, além de investigações que o tomavam como objeto, naquelas que o analisavam na sua vida escolar, na interação com professores e alunos (Garcia, N., 2017b).

Registre-se que, no âmbito do PNLD, desde 1996 os livros didáticos de Ciências destinados aos alunos do 5º ao 9º ano do Ensino Fundamental têm sido distribuídos a todos os alunos e professores das Redes Públicas de Ensino⁴. Os de Física, destinados aos alunos do Ensino Médio, por sua vez, chegaram aos alunos e professores somente a partir de 2009.

Como somente há uma década os livros didáticos de Física foram incorporados ao PNLD, chegando às escolas em 2009, a maior parte das pesquisas anteriores a esse momento, como a de Wuo (2000), dava mais atenção à organização dos conteúdos e à sua precisão conceitual.

Esse cenário, entretanto, por diversas motivações, tem-se modificado, e investigações mais amplas têm procurado analisar a incorporação aos livros didáticos de novos conteúdos, assim como de novas formas de trabalhar os conhecimentos científicos, além de, por conta da dinâmica do PNLD, procurar entender como tal objeto da cultura escolar tem sido escolhido pelos professores e usado por eles e pelos alunos.

Por conta do crescimento dos Programas de Pós-Graduação brasileiros, as pesquisas nessas temáticas têm também crescido significativamente. Um exemplo dessa produção é a ocorrida no âmbito da Linha de Pesquisa Cultu-

⁴ Integram as Redes Públicas de Ensino brasileiras as escolas federais, as escolas estaduais e as escolas municipais. Ensino Fundamental: anos iniciais, cerca de 95.000 escolas; anos finais: cerca de 49.000 escolas; Ensino Médio: cerca de 20.000 escolas.

ra, Escola e Processos Formativos em Educação, anteriormente denominada Linha de Pesquisa Cultura, Escola e Ensino, do Programa de Pós-Graduação em Educação da Universidade Federal do Paraná – UFPR, que, com a participação de pesquisadores do Núcleo de Pesquisa e Publicações Didáticas (NPPD-UFPR) e do Grupo de Estudos e Pesquisas em Ensino de Física da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR (GEPEF-UTFPR), tem, sistemática e intencionalmente, tomado como objeto científico múltiplos aspectos do livro didático de Física e de Ciências.

AS PESQUISAS SOBRE O LIVRO DIDÁTICO NO ÂMBITO DO PPGE DA UFPR

O Grupo de Pesquisa “Didática, Práticas Escolares e Publicações Didáticas” e o Núcleo de Pesquisa e Publicações Didáticas (NPPD-UFPR), ambos sob coordenação da Profa. Dra. Tânia Maria F. Braga Garcia, tem sido o local de maior produção de pesquisas sobre livros didáticos no PPGE da UFPR. Conforme descrito em seu *site*⁵, a temática que articula as ações do NPPD tem ensejado pesquisas com diversas ênfases voltadas aos livros didáticos de diversas disciplinas. Uma das vertentes que tomou corpo no âmbito do NPPD foram as que procuraram investigar os diversos aspectos relacionados aos livros didáticos de Física e de Ciências, a partir da articulação com o Grupo de Estudos e Pesquisas em Ensino de Física da UTFPR – GEPEF, do qual sou um dos líderes.

Realizadas principalmente no ambiente escolar, dando voz a alunos e professores, elas têm sistematicamente se centrado principalmente em questões relacionadas à escolha dos livros didáticos, ao seu uso por professores e alunos, sem descuidar de seus aspectos mercadológicos e de seu papel no âmbito da cultura escolar.

Visando sistematizar a apresentação dessa produção, elas foram agrupadas segundo tendências que mais se evidenciaram em cada uma delas, cujos focos, que serão detalhados a seguir, podem ser assim explicitados:

- O livro didático como produto cultural e como mercadoria;
- Relação dos manuais escolares com o processo de formação de professores;
- Pesquisas sobre conteúdos e temáticas específicas nos livros didáticos;
- Processos de análise, seleção e uso dos livros didáticos;
- Manuais escolares e recursos digitais;
- Estudos de revisão.

⁵ O *site* do NPPD pode ser acessado por meio do link <https://nppd.ufpr.br>

O LIVRO DIDÁTICO COMO PRODUTO CULTURAL E COMO MERCADORIA

As pesquisas realizadas nessa temática têm-se focado nas políticas brasileiras de distribuição de livros didáticos e na análise das relações que podem ser estabelecidas a partir da compreensão dos processos de avaliação, produção e circulação do livro didático, justificadas pela relevância que o Programa Nacional do Livro Didático – PNLD – tem assumido no contexto educacional e no mercado editorial brasileiro.

Orientados por critérios estabelecidos em editais, os livros submetidos ao PNLD têm sido avaliados por professores pesquisadores vinculados às universidades e também por professores da Educação Básica. Nesse sentido, pesquisas que visem investigar o que ocorre quando o livro chega às escolas e às mãos dos professores e alunos se revestem de grande importância.

Ao mesmo tempo, dada a magnitude do Programa, tanto em volume de recursos financeiros quanto em quantidade de livros distribuídos, este assume um papel significativo para as editoras, muitas das quais têm boa parte de suas receitas apoiadas na aprovação de obras de seus autores no PNLD. Isso faz com que, além de um artefato da cultura escolar e produto cultural, seus impactos como mercadoria têm sido também analisados.

RELAÇÃO DOS MANUAIS ESCOLARES COM O PROCESSO DE FORMAÇÃO DE PROFESSORES

Tomando como premissa e como opção metodológica da investigação a aproximação com a escola e a preocupação em ouvir, registrar e analisar as situações a partir da opinião dos professores e de alunos, e procurando responder e melhor interpretar essas questões, têm sido desenvolvidas pesquisas que abordam, dentre outras temáticas, a relação que os professores estabelecem com as orientações metodológicas contidas nos manuais; a didática presente nos manuais de ensinar a ensinar; as funções desempenhadas pelos livros didáticos; a sua presença na formação inicial dos professores; a influência que eles exercem no planejamento dos professores.

Os resultados dessas investigações, de maneira geral, têm indicado que, apesar da razoável eficiência da distribuição aos professores e alunos, nem sempre os livros didáticos têm sido utilizados com intensidade em sala de aula ou mesmo como elemento de suporte para atividades realizadas em casa. Sua utilização maior tem sido como apoio para a realização de exercícios ou leitura de alguns tópicos complementares.

Têm apontado também que em sua formação inicial, nos cursos de Licenciatura, nem todos têm acesso a discussões relativas às peculiaridades dos

livros didáticos. Por outro lado, contraditoriamente, o livro didático de Física e de Ciências tem-se mostrado um grande influenciador do currículo e do planejamento dos professores, mesmo que não tenha sido, de maneira geral, objeto de estudos críticos durante a formação dos docentes.

Com um outro enfoque, investigou-se a organização dos livros didáticos de Física mais utilizados nos cursos de Ensino Superior, tendo sido possível estabelecer uma influência dos livros do Ensino Superior sobre os do Ensino Médio, tanto em alguns aspectos formais quanto de conteúdo, o que, de certa forma, justifica os livros do Ensino Médio tenderem a ser mais tradicionais nesses aspectos.

PESQUISAS SOBRE CONTEÚDOS E TEMÁTICAS ESPECÍFICAS NOS LIVROS DIDÁTICOS

Mais focado nas disciplinas de Física e de Ciências, algumas das investigações realizadas têm procurado analisar alguns aspectos dos conteúdos abordados nos livros didáticos de Física e de Ciências aprovados pelo PNLD. Assim, tem-se investigado o seu uso em sala de aula, o significado que textos introdutórios podem imprimir aos conteúdos, as inovações que podem ser introduzidas nesses livros.

Alguns dos campos de conhecimento específicos que serviram de base para o desenvolvimento das pesquisas envolvem os conteúdos de Indução Eletromagnética, Campo Elétrico, Dinâmica e Termodinâmica. Enquanto conhecimentos escolares, tem sido possível perceber que, muitas vezes, o processo de transposição didática a eles aplicado tem gerado muitas simplificações dos conceitos presentes nos livros utilizados no ensino superior, revelando, dessa forma, a influência que estes exercem nos livros didáticos do Ensino Médio.

Outros aspectos que têm sido objeto de investigação dizem respeito à questão da História da Ciência e à linguagem utilizada nos livros. No primeiro aspecto, tem-se verificado que no livro didático, como regra, a História da Ciência sofre de um processo de simplificação que não contribui para uma compreensão mais elaborada da produção científica, o que é reforçado pela linguagem utilizada nos livros, que tem sido tradicional, com textos descritivos que apresentam poucas possibilidades de interação com os leitores.

PROCESSOS DE ANÁLISE, SELEÇÃO E USO DOS LIVROS DIDÁTICOS

Nessas pesquisas, da mesma forma que nas outras, está fortemente presente a opinião de professores e alunos sobre os processos por meio dos quais os livros de Física e de Ciências, no âmbito do PNLD, são avaliados, chegam

às escolas e são por eles utilizados, tanto em salas de aulas como em outros ambientes educativos. São também analisados outros fatores intervenientes, oriundos da comunidade em que as escolas se inserem, que se somam aos emanados por elas.

Resultados de investigações têm mostrado que o seu uso não tem sido intensivo, muitas vezes pelo peso dos livros que os alunos precisam levar ou pelo modelo didático aplicado por alguns professores, segundo o qual é ele quem conduz o processo de ensino e aprendizagem, muitas vezes sem o uso do livro didático.

Percebe-se, assim, que o livro tem desempenhado mais uma função de um recurso, como uma televisão ou um quadro de giz, não se integrando a um projeto mais articulado no qual seu uso esteja fazendo parte de um planejamento mais amplo, sendo mais intensivamente usado como repositório de exercícios para serem resolvidos em sala de aula ou como tarefa de casa. Por outro lado, em muitos casos, o livro didático tem desempenhado o papel de fonte de informação, material de apoio e material de pesquisa para o aluno e para o professor, compartilhando espaço com outros recursos na preparação e na execução das aulas.

Outra temática relativa aos livros de Ciências desenvolvida nas pesquisas procurou identificar a presença de elementos da cultura do local onde a escola se insere que interferem na escolha e no uso dos livros didáticos, demonstrando que aspectos da cultura local interferem tanto na escolha quanto no uso do livro didático, que sofre alterações para se adequar à realidade da comunidade em que é desenvolvida. Nesse particular, visando estabelecer comparações com relação ao uso do livro em comunidades distintas, pesquisas foram desenvolvidas em escolas do campo, de comunidades indígenas e de zona urbana.

Em outra vertente, com um objetivo mais prático e com a intenção de contribuir para a escolha de livros pelos professores, outras pesquisas foram realizadas com o objetivo de elaborar instrumentos que pudessem auxiliá-los neste processo. Essa demanda surgiu pelo fato de que os professores precisam decidir, num intervalo de tempo relativamente curto, entre diversos livros aprovados pelo PNLD. Dada a responsabilidade dessa ação e a quantidade de trabalho adicional acarretada, muitas vezes a escolha ocorre apoiada por critérios que nem sempre levam em conta as características dos livros que podem melhor contribuir para o processo de ensino-aprendizagem.

MANUAIS ESCOLARES E RECURSOS DIGITAIS

A presença de elementos das Tecnologias de Informação e Comunicação – TIC – nos livros didáticos de Física e de Ciências, principalmente a partir do momento em que eles passaram a ser avaliados e distribuídos pelo PNLD, passou a ser constante e crescente. Em 2015, com a incorporação aos livros didáticos aprovados pelo PNLD 2015 de *softwares* e Objetos Educacionais Digitais – OED, houve um incremento de pesquisas visando investigar como têm sido incorporadas as Tecnologias de Informação e Comunicação aos livros didáticos aprovados no Programa.

Nesse sentido, algumas pesquisas foram desenvolvidas nessa temática. Uma delas analisou como as TIC foram sendo incorporadas aos livros, tomando como referência uma obra aprovada em três PNLD sucessivos: 2009, 2012 e 2015, sendo verificada a ocorrência de um significativo aumento das TIC nesse período.

Outras pesquisas foram desenvolvidas no sentido de analisar como têm sido o acesso, a confiabilidade e a usabilidade desses Objetos Educacionais Digitais, principalmente os de acesso livre, haja vista que sua presença ocorre em livros distribuídos a todos os professores e alunos das escolas públicas, não tendo sentido a divulgação de *links* de *softwares* ou aplicativos proprietários, que impediriam o acesso da maior parte dos usuários dos livros. As pesquisas demonstraram que nem sempre o acesso aos aplicativos disponibilizados nos livros didáticos tem sido fácil, pois muitos deles, em intervalo de tempo relativamente curto, ficam inacessíveis, por descontinuidade do próprio *site* de hospedagem ou da plataforma na qual foram elaborados.

As pesquisas nesse sentido demonstraram que, apesar de diversos problemas para o acesso aos OED, os mesmos têm desempenhado um papel importante de complementaridade aos livros em suporte de papel.

Com o olhar voltado para a acessibilidade dos materiais utilizados por alunos e professores, outras pesquisas têm sido realizadas amparadas na legislação brasileira que estabelece a igualdade de oportunidades para todas as pessoas com deficiência. Assim, tem-se investigado as diferentes metodologias, os recursos e as ferramentas que docentes utilizam para que alunos com deficiência visual tenham pleno acesso aos conteúdos das disciplinas desenvolvidas no ensino regular.

De maneira geral, é importante a análise da incorporação dessas novas tecnologias no cotidiano escolar, do referencial teórico em que são elaboradas, das relações que podem ser estabelecidas com outros materiais e do significado que essa incorporação pode ter no processo de ensino e aprendizagem, por exemplo, pois são elementos que desafiam e alimentam as pesquisas atuais sobre os livros didáticos.

ESTUDOS DE REVISÃO

Nesse particular, tem sido objeto de análise a produção de pesquisas a partir da revisão de trabalhos apresentados nos eventos brasileiros da Área de Ensino de Física e de Ciências mais significativos, como, por exemplo, o Simpósio Nacional de Ensino de Física, o Encontro de Pesquisa em Ensino de Física e o Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências.

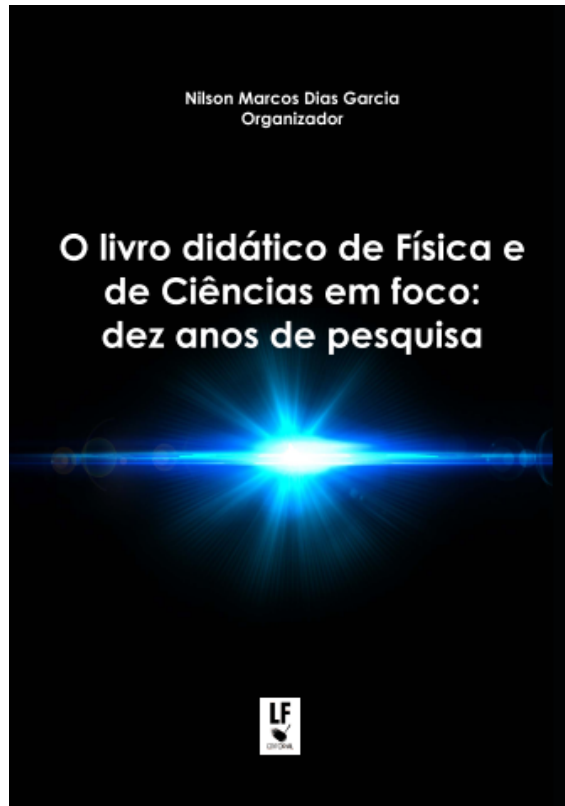
As análises dos artigos apresentados nesses eventos têm permitido inferir uma mudança no foco das pesquisas sobre os diversos aspectos relacionados aos livros didáticos, privilegiando a linguagem e a metodologia, em detrimento dos estudos anteriores, que se preocupavam mais com a análise dos conteúdos.

Nesse sentido, tem sido explorada pelo grupo a análise das concepções pedagógicas e metodológicas que têm influenciado a autoria e a produção de livros didáticos brasileiros de Física e de Ciências. Esses estudos se revestem de grande importância, pois a partir deles podem ser obtidos elementos para o estudo histórico da constituição dessas disciplinas escolares e para a reflexão acerca de sua inserção na cultura escolar.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao apresentar o conjunto de textos que representam, de alguma forma, a produção de mais de uma década, procurou-se evidenciar o esforço feito pelo grupo de pesquisadores para estabelecer relações entre o livro didático e os elementos da sociedade e da cultura, tomando como referência as atividades desenvolvidas na escola.

Além de serem apresentadas em eventos e publicadas em periódicos, elas foram agrupadas no livro intitulado *O livro didático de Física e de Ciência em foco: dez anos de pesquisa* (Garcia, N., 2017a), com a intenção de lhes dar maior visibilidade.



Esse esforço readquire e renova seu sentido, haja vista as diversas mudanças em andamento ou já realizadas pelo sistema educacional brasileiro, como, por exemplo, a expansão dos cursos de Licenciatura em Física com vistas a suprir a falta de profissionais para atuação na Escola Básica; a reforma do Ensino Médio; a implantação de uma Base Nacional Curricular Comum e, principalmente, aquelas que modificam aspectos dos rumos do Programa Nacional do Livro Didático – PNLD, que podem comprometer toda a experiência acumulada ao longo das últimas décadas.

Todas essas são questões que certamente irão, a médio prazo, influenciar diversas políticas públicas, o que exigirá a atenção da pesquisa sobre as temáticas relativas ao ensino e, entre elas, sobre a questão dos livros escolares e outros materiais que fazem parte da cultura escolar. Essa perspectiva coloca em evidência a complexidade desse objeto da cultura escolar, como apontado por diferentes autores, e sugere potencialidades nesse ainda promissor e intrigante campo de investigação, além de oferecer motivações para a sua continuidade.

AGRADECIMENTOS

O autor agradece o apoio recebido da Sociedade Brasileira de Física para participar do evento.

REFERÊNCIAS

- Bresser-Pereira, L. C. (2015). *A construção política do Brasil*. São Paulo: Editora 34.
- Choppin, A. (2004). História dos livros e das edições didáticas: sobre o estado da arte. *Educação e Pesquisa*, 30(3), 549-566. São Paulo, set/dez.
- Garcia, N. M. D. (2012). Livro didático de Física e de Ciências: contribuições das pesquisas para a transformação do ensino. *Educar em Revista*, 44, 145-163. Curitiba, Brasil: Editora UFPR, abr./jun.
- Garcia, N. M. D. (Org.). (2017a). *O livro didático de Física e de Ciências em foco: dez anos de pesquisa*. São Paulo: Livraria da Física.
- Garcia, N. M. D. (2017b) Apresentação. In Garcia, N. M. D. (Org.). *O livro didático de Física e de Ciências em foco: dez anos de pesquisa*. São Paulo: Livraria da Física. p. 9-17.
- Garcia, T. M. F. B. (2017). Relações de professores e alunos com os livros didáticos de Física. In Garcia, N. M. D. (Org.). *O livro didático de Física e de Ciências em foco: dez anos de pesquisa*. São Paulo: Livraria da Física. Cap. 8, p. 117-128.
- Hallewell, L. (2005). *O livro no Brasil: sua história*. São Paulo: EDUSP.
- Lorenz, K. M. (2008). Ação de instituições estrangeiras e nacionais no desenvolvimento de materiais didáticos de ciências no Brasil: 1960 -1980. *Revista Educação em Questão*, 31(17), 7-23. Natal, RN: UFRN/Centro de Ciências Sociais Aplicadas, jan./abr.
- Wuo, W. (2000). *A física e os livros: uma análise do saber física nos livros didáticos adotados para o ensino médio*. São Paulo: EDUC/FAPESP.

ESCOLHA DE LIVROS DIDÁTICOS POR PROFESSORES DE FÍSICA: CULTURA ESCOLAR E MERCADORIA^{*}

CHOICE OF TEXTBOOKS BY PHYSICS TEACHERS: SCHOOL CULTURE AND COMMODITY

Alisson Antonio Martins¹
Nilson Marcos Dias Garcia²

RESUMO

Apresentam-se os resultados de uma pesquisa qualitativa cujo objetivo foi identificar de que modo a cultura escolar, a produção cultural e o mercado, enquanto eixos analíticos, se fazem presentes nas considerações relativas aos processos de escolha de livros didáticos de Física por professores que atuam na Educação Básica. Os sujeitos da pesquisa foram professores brasileiros e portugueses que possuem características formativas e profissionais semelhantes, configurando-se em uma amostra intencional, orientada a um objetivo específico. Realizada em duas etapas, a pesquisa se desenvolveu por meio da aplicação de questionários e com a realização de entrevistas semiestruturadas. As informações obtidas foram analisadas segundo procedimentos da análise de conteúdo, possibilitando a construção de resultados que indicaram que a escolha dos livros didáticos pelos professores pesquisados norteia-se, prioritariamente, pela cultura escolar, numa relação que envolve também aspectos mercadológicos e da produção cultural. A escolha dos livros didáticos a partir da dimensão da cultura escolar se revelou por meio da importância atribuída às funções instrumentais e referenciais cumpridas por esses livros no espaço escolar, em listas de exercícios e em atividades experimentais, bem como por sua adequação aos currículos oficiais e aos processos seletivos de acesso ao Ensino Superior. Quanto à produção cultural, a autoria e a organização dos conteúdos de ensino motivam e influenciam a escolha destes livros, tendo esta questão se revelado prioritariamente para os professores brasileiros. Elementos de ordem conjuntural motivaram os professores portugueses a perceber a dimensão de mercadoria dos livros didáticos de modo mais acentuado, aludindo às distinções do mercado editorial entre os dois países. Em termos gerais, aponta-se que os professores de Física, ao escolherem seus livros didáticos, realizam uma ponderação complexa entre os elementos da cultura escolar, da produção cultural e do mercado, ou seja, esta escolha não se encerra em um determinado momento, de maneira pontual e isolada, mas desenvolve-se por meio de um processo complexo de produção de sentidos e significados, articulado com as características dos contextos culturais, econômicos e sociais em que estes professores se inserem.

Palavras-chave: Livro didático de Física, Produção cultural, Cultura escolar, Livros didáticos e mercadoria, Escolha de livro didático.

^{*} O presente texto foi originalmente apresentado no XXI Simpósio Nacional de Ensino de Física, em 2015 sob o título “Escolha de livros didáticos por professores de Física: relações entre cultura escolar, cultura e mercado”.

¹ UTFPR/DAFIS/PPGFCET, amartins@utfpr.edu.br. Pesquisa desenvolvida com bolsa Capes/Reuni e PDSE.

² UTFPR/PPGTE - UFPR/PPGE, nilson@utfpr.edu.br e nilsondg@gmail.com. Com apoio parcial do CNPq e da Fundação Araucária - PR.

EXTENDED ABSTRACT

RESEARCHES ABOUT TEXTBOOKS

In recent years, researches about Physics textbooks in Brazil has expanded as a result of the strengthening of government public policies for the purchase and distribution of these books, especially the National Textbook Program, which has been in existence since 1985, and it is possible to notice the existence of at least four main lines of research.

A first line of research corresponds to critical, historical and ideological studies on the content of books. A second line of research concerns formal, linguistic and psycho-pedagogical studies on the readability and comprehensibility of books, as well as elements on their presentation and general suitability. The third is related to studies on cultural policies, publishing and the political economy of books, materialized in the levels of production, circulation and consumption. And finally, the fourth line, corresponding to research on the uses of the textbook in school space which, although not widely explored, represents a different approach from the others (Garcia, 2009).

In the scope of this work will be presented the results of an investigation carried out by Martins (2014) based on the assumption that Physics textbooks should be understood through the articulation between three analytical axes: school culture, cultural production and market relations. Thus, this work aimed at identifying how these dimensions are presents in Physics teachers considerations about process of choosing their textbooks.

METHODOLOGICAL ASPECTS OF FIELD RESEARCH

Characterized as a qualitative research, of a descriptive and interpretative nature, this research was carried out together with a group of Brazilian and Portuguese Physics teachers who work in Basic Education, being configured in an intentional sample, oriented to a specific objective. The investigation was carried out in two stages, obtaining a set of information from the teachers, constituting the main object of analysis of the field research. For the interpretation of this set of information, the procedures of content analysis proposed by Bardin (1994) were adopted.

The survey initially comprised the application of a questionnaire, through an online form sent to thirty Brazilian teachers, of whom seventeen returned, and thirty-three Portuguese teachers, with fourteen questionnaires returned. Following this, semi-structured interviews were conducted with eight Brazilian teachers and seven Portuguese teachers, with the aim of exploring aspects related to the choice of the Physics textbook, providing teachers with more open and in-depth exposure on this process.

Of the thirty-one participating teachers, twenty-three work exclusively in public schools, seven work simultaneously in public and private schools, four of them with more time in public school and three in private school and only one teacher works exclusively in private schools.

Twenty-five teachers work predominantly in secondary school, four in primary school and two in secondary technical education; however, all have indicated that they have teaching experience with adolescents (high school). In terms of professional experience, the majority of these teachers have worked for more than eleven years, with only seven having worked for less than ten years.

RESULTS AND ANALYSIS

In general terms, when choosing a textbook on Physics, both for Brazilian and Portuguese teachers, the predominant interpretation is that it is an element of school culture, fulfilling instrumental and referential functions in its teaching activities (Choppin, 2004).

Although the specificities of formal schooling occupy a central place in the considerations presented by the teachers researched, it was possible, however, to identify elements of which they also consider textbooks as cultural products and as commodity.

Regarding the dimension of cultural production, among other aspects, some of the teachers researched point out that, objectively, they do not recognize that textbooks in Physics may have another value or other meaning that goes beyond their relevance to teaching-learning processes. The possibility of extrapolating, for example, a “conventional” use, based on the analysis of pre-designed examples or on the resolution of exercises, from the attribution of a special meaning to reading, to the care with the elements of connection with the students’ daily life, among other aspects, also indicates that the researched teachers have in view the insertion of textbooks in the scope of a wider cultural process

On the marketing dimension of textbooks it was possible to perceive two main orders of concern, one on the issue of access to books and the other on the role of publishers in the choice process.

FINAL CONSIDERATIONS

Through the analysis of the results, it was possible to see that the choice of textbooks in Physics by the participating teachers is marked by the relationship between elements of school culture, culture and the market. However, it is evident that because they consider the textbook as an artifact of school

culture, they give priority to those elements related to this dimension, while taking into account, in certain aspects, its relationship with other dimensions

As a multi-factorial process of production of meanings and senses, the choice of textbooks in Physics must be understood, therefore, as the result of a complex weighting of the relationship between school culture, cultural production and commercial production.

Palavras-chave: Physics textbooks, Cultural production, School culture, Textbooks and market, Choosing a textbook on Physics.

INTRODUÇÃO – PESQUISAS SOBRE OS LIVROS DIDÁTICOS

Nos últimos anos, as pesquisas sobre os livros didáticos de Física no Brasil têm se ampliado, fato que pode ser compreendido em função do fortalecimento de programas governamentais de compra e de distribuição destes livros, tais como o Programa Nacional do Livro Didático para o Ensino Médio (PNLEM) e, logo após, com a incorporação das obras destinadas ao Ensino Médio ao Programa Nacional do Livro Didático (PNLD), política pública existente no Brasil desde 1985.

Em uma década de vigência de programas de compra e de distribuição de livros didáticos para os estudantes do Ensino Médio, houve um aumento nas publicações de resultados de investigações sobre os livros didáticos de Física e de Ciências em periódicos especializados e em eventos científicos (Leite, Garcia & Rocha, 2011; Souza & Garcia, 2013). Este aumento sinaliza a superação de uma condição anterior, em que havia um baixo número de investigações sobre os livros didáticos de Física (Ferreira & Selles, 2004), indicando a consolidação de uma tendência de pesquisa com múltiplas abordagens, fortalecida, essencialmente, pela existência de programas governamentais desta natureza.

Apesar de este aumento ter sido verificado na última década, ainda é válida a afirmação de Choppin (2004), quando aponta que as investigações sobre as publicações didáticas são relativamente recentes no âmbito das pesquisas educacionais, pois, embora seja possível identificar pesquisas realizadas já a partir de 1950 (Garcia, 2009), estas receberam um impulso significativo há pouco mais de trinta anos:

Se, a partir dos anos 1980, as iniciativas em fazer o recenseamento da produção escolar se multiplicaram, também mudaram de dimensão: tais operações não mais se limitaram a inventariar uma lista específica de livros ou elaborar uma bibliografia seletiva ou indicativa; visam, de agora em diante, a serem exaustivas (Choppin, 2004, p. 561).

Enquanto uma característica desta exaustividade verifica-se, na atualidade, uma proliferação de linhas de investigação, com uma vasta gama de enfoques e de abordagens nas pesquisas sobre os livros didáticos. Não obstante a dificuldade de categorizar o conjunto da produção acadêmica sobre as publicações didáticas, Choppin (2004), Reiris (2005) e Garcia (2009) fornecem elementos para que se perceba a existência de, pelo menos, quatro linhas de investigação principais.

Segundo estes estudos, uma primeira linha de investigação corresponde a estudos críticos, históricos e ideológicos sobre o conteúdo dos livros. A segunda se refere a estudos formais, linguísticos e psicopedagógicos sobre a legibilidade e a compreensibilidade dos livros, além de elementos sobre sua apresentação e adequação geral. A terceira está relacionada a estudos sobre as políticas culturais, editoriais e a economia política do livro, materializada nos níveis da produção, da circulação e do consumo. E, por fim, a quarta linha, correspondente às pesquisas sobre os usos do livro didático no espaço escolar, que, embora não tenha sido explorada amplamente, representa uma abordagem diferente das demais (Garcia, 2009).

Em linhas gerais, Choppin (2004) indica que as pesquisas sobre os livros didáticos também podem ser compreendidas por meio da relação que é estabelecida com estes livros em dois níveis mais amplos. Por um lado, o autor indica que alguns estudos abordam os livros didáticos como um “documento histórico” ou preocupam-se essencialmente com os conteúdos de que são portadores. Por outro, para além dos conteúdos presentes nos livros, outros estudos consideram-nos enquanto um “objeto físico”, em sua dimensão de “produto fabricado”, privilegiando a compreensão sobre a sua comercialização, circulação, distribuição, avaliação e consumo através do uso em certos contextos (p. 554).

A consideração destes dois níveis de categorização implica sobre os modos de se compreender o que sejam os livros didáticos. Ou seja, a preocupação com aquilo que se faz presente nos livros didáticos ou através de sua existência material indica a possibilidade de compreendê-los em função de suas especificidades em articulação com as necessidades que emergem do cotidiano escolar em suas relações com o todo da sociedade.

As suas especificidades permitem compreender que os livros didáticos se constituem em artefatos da cultura escolar, pois estão de acordo com uma determinada forma de relacionar o conhecimento científico ao conhecimento escolar, com vistas a sua didatização (Forquin, 1993). Neste sentido, o livro didático é entendido como um objeto destinado à educação formal no contexto da educação escolar, de forma que é possível se entender, conforme Chervel (1990), que os conhecimentos que se expressam nos livros didáticos de Física, vinculados aos conhecimentos específicos desta disciplina escolar, guardam relações com os conhecimentos escolares (Lopes, 1999), distinguindo-se dos

da ciência de referência por sua função social específica nos processos de escolarização.

O estudo das relações entre os livros didáticos e a estrutura social mais ampla, possibilita compreendê-los, em contrapartida, enquanto produtos culturais (Bittencourt, 2004), em função dos distintos sentidos e significados atribuídos aos livros pelos diversos grupos sociais. Da mesma forma, a análise de sua produção e de seu consumo pode ser compreendida por meio de elementos de ordem econômica, abordando-se estes livros como resultado de uma determinada atividade que os considera como mercadorias (Apple, 1995; Munakata, 2012).

Assim, partindo do pressuposto de que os livros didáticos de Física devem ser compreendidos pela articulação entre a cultura escolar, a produção cultural e as relações mercantis, no âmbito deste trabalho, serão apresentados os resultados de uma investigação realizada por Martins (2014), que objetivou identificar o modo como estas dimensões, tomadas como eixos analíticos, se fazem presentes nas considerações de um conjunto de professores de Física quando em processo de escolha de seus livros didáticos. Dentro deste conjunto interpretativo, buscou-se verificar de que modo estes aspectos são considerados pelos professores, como eles compreendem e estabelecem relações entre as dimensões constituintes dos livros didáticos, enquanto elementos da cultura escolar, produtos culturais ou produtos mercantis e de que modo eles percebem as possíveis conexões entre estas distintas dimensões.

Essa preocupação acadêmica encontra justificativa na necessidade de se ampliar a compreensão acerca de processos pouco privilegiados nas pesquisas, tais como os que se referem à escolha destes materiais, tomados enquanto elementos da cultura escolar e como mercadorias, principalmente pela importância que os livros didáticos sempre tiveram para o ensino de Física no contexto escolar e os altos investimentos públicos que têm sido dispendidos em programas de compra e distribuição de livros didáticos. Além disso, dada a oportunidade de envolver professores portugueses na pesquisa, também foi possível verificar como aspectos da dimensão da produção cultural podem ser considerados.

ASPECTOS METODOLÓGICOS DA PESQUISA DE CAMPO

Caracterizada como uma pesquisa qualitativa, de natureza descritiva e interpretativa, esta investigação foi realizada junto a um grupo de professores de Física brasileiros e portugueses que atuam na Educação Básica, configurando-se em uma amostra intencional, orientada a um objetivo específico. A investigação foi realizada em duas etapas, com obtenção de um conjunto de

informações junto aos professores, constituindo-se no principal objeto de análise da pesquisa de campo.

Para a interpretação deste conjunto de informações, foram adotados os procedimentos da análise de conteúdo propostos por Bardin (1994), considerando que a mensagem expressa o sentido e o significado presentes nos textos obtidos com os instrumentos de pesquisa. Enquanto percurso metodológico, a análise de conteúdo envolveu a leitura flutuante dos textos, o levantamento de hipóteses sobre os elementos que foram apresentados pelos professores em face da escolha, a elaboração de categorias e o retorno ao texto para a construção de relações com os aspectos teóricos que fundamentaram a pesquisa.

Num primeiro momento, a pesquisa compreendeu a aplicação de um questionário, com o uso de um formulário *on-line*, com o intuito de obter informações sobre a formação acadêmica, a atuação profissional, as experiências em pesquisas e eventos científicos, além de um conjunto de elementos relativos ao processo de escolha dos livros didáticos de Física. Foram enviados questionários a trinta professores brasileiros, dos quais retornaram dezessete, e a trinta e três professores portugueses, com retorno de quatorze questionários.

Na sequência, foram realizadas entrevistas semiestruturadas com oito professores brasileiros e com sete portugueses, com o intuito de explorar aspectos relacionados à escolha do livro didático de Física, oportunizando aos professores uma exposição mais aberta e aprofundada sobre este processo.

Para uma breve caracterização dos sujeitos de pesquisa, aponta-se que, dos trinta e um professores participantes, vinte e três atuam exclusivamente em escolas da rede pública de ensino, sete atuam simultaneamente em escola pública e em escola particular, quatro deles com mais tempo na escola pública e três na escola particular e apenas um professor atua exclusivamente em escola particular.

Vinte e cinco professores atuam, predominantemente, na escola secundária, quatro no ensino fundamental e dois no ensino técnico de nível secundário; entretanto, todos indicaram que possuem experiência de ensino com adolescentes (Ensino Médio no Brasil, Secundário em Portugal). Sobre o tempo de atuação profissional, este conjunto de professores apresenta, em sua maioria, um tempo de trabalho superior a onze anos, com apenas sete atuando há menos de dez anos.

RESULTADOS E ANÁLISES

A análise do conjunto de informações obtidas por meio dos questionários e das entrevistas semiestruturadas permitiu observar elementos de aproximação e de afastamento acerca dos aspectos considerados para a escolha dos livros didáticos de Física pelos dois grupos de professores pesquisados.

Em linhas gerais, tanto para os professores brasileiros quanto para os portugueses, a escolha do livro didático assume como pressupostos centrais as especificidades de sua destinação para o uso escolar. Esta característica da escolha indica que a consideração do livro didático de Física como um elemento da cultura escolar predomina frente às demais dimensões consideradas, isto é, a de que ele é também um produto cultural e uma mercadoria.

Esta predominância pode ser exemplificada pela consideração de elementos que, notadamente, se relacionam ao significado que o livro didático possui para o processo de ensino-aprendizagem da Física. Ou seja, predominantemente, os professores pesquisados consideram que os livros didáticos de Física cumprem funções instrumentais e referenciais (Choppin, 2004), destacando-se que a sua escolha ocorre em função da presença de atividades experimentais e de listas de exercícios de aplicação.

A título de exemplo, a importância das listas de exercício para a escolha pode ser evidenciada pelos seguintes excertos que expressam os posicionamentos de dois professores, um brasileiro e um português, respectivamente:

– Além da necessidade de ter boas orientações com o professor de física, o aluno precisa, para aprender, treinar questões diferenciadas. (B16Q³)

– Os aspectos que mais valorizo num manual são a exploração acessível e cientificamente correta dos conteúdos, a presença de informação gráfica (imagens, tabelas, gráficos) que apoie a compreensão desses conteúdos e a existência de exercícios de aplicação variados que permitam a sua consolidação. (P09Q)

Outro aspecto que indica a predominância da cultura escolar na escolha dos livros didáticos de Física se revelou em função das considerações dos professores, que procuram livros que estejam de acordo com as orientações curriculares oficiais vigentes em cada país. Neste particular, destacam-se algumas diferenças em relação às orientações curriculares do Brasil e de Portugal, impactando, conseqüentemente, sobre o processo de escolha dos livros didáticos de Física. Enquanto em Portugal o currículo oficial é unificado nacionalmente, no Brasil existem, além de diretrizes e parâmetros curriculares nacionais, também orientações curriculares estaduais.

Esta distinção contribui para que os professores portugueses pesquisados percebam que os livros didáticos de Física guardem grande homogeneidade com o currículo oficial, ao passo que, para os professores brasileiros,

³ O código entre parênteses ao final do excerto indica se o professor é brasileiro (B) ou português (P), acompanhando-se da numeração atribuída ao sujeito e da fonte da informação: questionário (Q) ou entrevista (E). Neste caso, a informação foi obtida no questionário respondido pelo professor brasileiro B16.

por conta das diferentes orientações, esta homogeneidade não é verificada de modo satisfatório, uma vez que esses livros têm a sua produção pautada, heemonicamente, nos pressupostos das orientações nacionais em detrimento das estaduais. O posicionamento a seguir exemplifica esta ordem de dificuldade:

– Outra coisa que, na escolha do livro que eu, não me agrada, que, de acordo com o PCN, e, lá [no Estado] nós temos também o [currículo do estado], que (...) nós temos que seguir. A escola exige que tenha que seguir. O que acontece? No [currículo do estado] eles colocam conteúdos pra serem ministrados no primeiro ano, conteúdos que eu só vou encontrar no livro do terceiro ano. (B04E)

Ainda sobre a noção de cultura escolar, os professores consideram a adequação das obras aos processos seletivos de acesso ao ensino superior como um importante aspecto para a sua escolha, não obstante as diferenças entre estes processos, consonantes às orientações curriculares de cada país. Se, por um lado, os professores portugueses indicam selecionar um livro didático que esteja fortemente relacionado aos exames de acesso ao ensino superior, por outro, os brasileiros apontam que as diferenças entre os variados processos seletivos implicam uma dificuldade para a escolha do livro quando tomado como elemento norteador apenas o acesso ao ensino superior, uma vez que é praticamente impossível encontrar uma obra que atenda às mais variadas exigências.

Embora os aspectos relativos às especificidades da escolarização formal ocupem um espaço central nas considerações apresentadas pelos professores pesquisados, foi possível identificar, entretanto, elementos para que eles considerem os livros didáticos também como produtos culturais e como mercadorias.

Sobre a dimensão da produção cultural, alguns dos professores pesquisados apontam que, objetivamente, não reconhecem que os livros didáticos de Física possam ter outro valor ou outro significado que supere a sua pertinência para os processos de ensino-aprendizagem. Porém, foi possível perceber que a presença de elementos diferenciados nos livros contribui para que eles sejam considerados como produtos culturais. A possibilidade de extrapolar, por exemplo, um uso “convencional”, pautado na análise de exemplos pré-elaborados ou na resolução de exercícios, a partir da atribuição de um significado especial à leitura, ao cuidado com os elementos de ligação com o cotidiano dos alunos, entre outros aspectos, indica que os professores pesquisados têm em vista a inserção dos livros didáticos no âmbito de um processo cultural mais amplo.

Outros elementos que indicam a percepção de que os livros didáticos de Física são produtos culturais estão relacionados à questão da autoria e da seleção e organização dos conteúdos de ensino.

A importância da autoria dos livros didáticos de Física se expressou, predominantemente, entre os professores brasileiros, por meio do levantamento de questionamentos críticos acerca da linguagem utilizada, do nível dos livros e da formação acadêmica dos autores. Do mesmo modo, a organização dos conteúdos de ensino pode ser compreendida em face da produção cultural, por se tratar de uma apresentação determinada em face de uma “tradição seletiva” (Williams, 2011), em que determinados conteúdos são privilegiados em detrimento de outros.

Sobre a dimensão mercadológica dos livros didáticos foi possível perceber duas ordens principais de preocupação, uma relativa à questão do acesso aos livros e outra sobre o papel das editoras no processo de escolha.

Em relação ao acesso aos livros didáticos, os professores portugueses apresentaram posicionamentos mais acentuados acerca de suas características mercadológicas, ressaltando aspectos relativos à situação de crise econômica pela qual passa o país. Neste sentido, estas percepções foram motivadas, essencialmente, por elementos de ordem conjuntural, estando atreladas aos impactos que recaem sobre o orçamento familiar dos estudantes que devem comprar os livros didáticos a serem utilizados durante o ano letivo.

De modo diferenciado, os professores brasileiros também levantaram considerações sobre o caráter mercadológico dos livros didáticos, porém, através da percepção de que a sua distribuição gratuita, no contexto do PNLD, implica a realização social de seu valor, com a participação de toda a sociedade por meio do pagamento de impostos. Este aspecto é especialmente importante, pois indica que as preocupações dos professores brasileiros se diferenciam das dos portugueses, por considerarem que a dimensão mercadológica se revela de um modo estrutural, não meramente conjuntural, estando relacionada a outros aspectos sociais.

Sobre a presença, quando ostensiva, das editoras no processo de seleção, o conjunto de professores brasileiros se demonstrou desfavorável a esta ação, enquanto que o conjunto de professores portugueses a encara com relativa normalidade, embora alguns também tenham se posicionado criticamente.

Foi apontado pelos participantes que a prática de distribuição de brindes às escolas expressa um fortalecimento da dimensão mercadológica dos livros didáticos. Ou seja, essa prática estimularia a efetivação da escolha de determinadas obras pelos professores e possibilitaria que, no caso das escolas públicas brasileiras, as editoras conseguissem fazer com que suas coleções fossem adquiridas pelo governo, no âmbito do PNLD e, no caso das escolas particulares brasileiras e do conjunto de escolas portuguesas, a indicação de determinadas obras representaria a possibilidade de ampliação das vendas en-

tre os alunos. Assim, ao se ressaltar os recursos que acompanham os livros, ocorre um deslocamento do que deveria ser central para a sua escolha, representando, estritamente, uma vantagem de mercado de determinada editora sobre as demais.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por meio da análise dos resultados da investigação, percebeu-se que a escolha dos livros didáticos de Física pelos professores participantes ocorre marcada pela relação entre elementos da cultura escolar, da cultura e do mercado, ficando evidenciado, entretanto, que, por considerarem o livro didático como um artefato da cultura escolar, privilegiam, prioritariamente, aqueles elementos relativos a essa dimensão, sem deixar de, sob determinados aspectos, levar em consideração a relação desta com as demais dimensões.

Da mesma forma, entretanto com menor intensidade, ao se considerar que no processo de escolha estes livros passam por uma seleção cultural pelos professores, tendo em vista o atendimento de distintas necessidades, verifica-se que as formas de apropriação destes objetos variarão em função das especificidades de cada região e na medida em que cada uma delas se faz necessária, em suas articulações com o todo da sociedade. Por outro lado, processos de produção, distribuição e consumo de livros didáticos também são levados em conta nas considerações dos professores, revelando-se que a sua compreensão enquanto mercadoria contribui para as formas de sua indicação.

Enquanto um processo multifatorial de produção de sentidos e significados, a escolha dos livros didáticos de Física deve ser compreendida, portanto, como uma ponderação complexa da relação entre a cultura escolar, a produção cultural e a produção mercantil. Ou seja, enquanto um processo de mediação, a escolha dos livros não pode ser identificada como uma atividade que ocorre em um determinado momento do ano, de maneira pontual e isolada, pois a relação entre as dimensões consideradas implica uma tomada de posição que se desenvolve por meio de um conjunto de experiências formativas e profissionais, articuladas aos contextos culturais, econômicos e sociais em que estes se inserem.

AGRADECIMENTOS

O autor Nilson M. D. Garcia agradece o apoio recebido da Sociedade Brasileira de Física para participar do evento.

REFERÊNCIAS

- Apple, M. (1995). *Trabalho docente e textos: economia política das relações de classe e de gênero em Educação*. Porto Alegre: Artes Médicas.
- Bardin, L. (1994). *Análise de conteúdo*. Lisboa: Edições 70.
- Bittencourt, C. M. F. (2004). Autores e editores de compêndios e livros de leitura (1810-1910). São Paulo, *Educação e Pesquisa*, 30(3), 475-491, set/dez.
- Chervel, A. (1990). História das disciplinas escolares: reflexões sobre um campo de pesquisa. *Teoria e Educação*, 2, 177-229. Porto Alegre.
- Choppin, A. (2004). História dos livros e das edições didáticas: sobre o estado da arte. São Paulo, *Educação e Pesquisa*, 30(3), 549-566, set/dez.
- Ferreira, M. S., & Selles, S. E. (2004). Análise de livros didáticos em Ciências: entre as ciências de referência e as finalidades sociais da escolarização. *Educação em Foco*, 8(I e II), 63-78. Juiz de Fora.
- Forquin, J. C. (1993). *Escola e cultura: as bases sociais e epistemológicas do conhecimento escolar*. Porto Alegre: Artes Médicas.
- Garcia, T. M. F. B. (2009). Relações de professores e alunos com os livros didáticos de Física. *Anais do Simpósio Nacional de Ensino de Física*, 18, Vitória, 2009. Vitória: SBF, 2009 (p. 1-10).
- Leite, A. E., Garcia, N. M. D., & Rocha, M. (2011). Tendências de Pesquisa sobre os Livros Didáticos de Ciências e Física. *Anais do Congresso Nacional de Educação – EDUCERE*, 10, Curitiba, 2011; *Anais do Seminário Internacional de Representações Sociais, Subjetividade e Educação – SIRSSE*, 1, Curitiba, 2011. Curitiba: PUCPR, 2011 (p. 1-13).
- Lopes, A. C. (1999). *Conhecimento escolar: ciência e cotidiano*. Rio de Janeiro: EDUERJ.
- Martins, A. A. (2014). *Artefato da cultura escolar ou mercadoria? A escolha do livro didático de Física em análise*. 2014. 214f. [Tese não publicada de Doutorado em Educação]. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR.
- Munakata, K. (2012). O livro didático como mercadoria. *Pro-Posições*, 23(3-69), 51-66. Campinas, set/dez.
- Reiris, A. F. (2005). *La importancia de ser llamado “libro de texto”*: hegemonía y control del currículum en el aula. Buenos Aires: Miño y Dávila.
- Souza, E. L. de & Garcia, N. M. D. (2013). As pesquisas sobre o livro didático de Física e Ciências: temas e perspectivas presentes nos SNEFs. *Anais do Simpósio Nacional de Ensino de Física*, 20, São Paulo, 2013. São Paulo: SBF, 2013 (p. 1-8).
- Williams, R. (2011). *Cultura e materialismo*. São Paulo: Editora UNESP.

A PARTICIPAÇÃO DE SÃO TOMÉ E PRÍNCIPE NAS MASTERCLASSES INTERNACIONAIS DE FÍSICA DE PARTÍCULAS

THE PARTICIPATION OF SÃO TOMÉ E PRÍNCIPE IN THE INTERNATIONAL MASTERCLASSES – HANDS ON PARTICLE PHYSICS

Lúcio Carvalho¹
Manuel Penhor²

RESUMO

Masterclasses de Física de Partículas é uma iniciativa da Organização Europeia para a Investigação Nuclear (CERN), com âmbito internacional, que pretende trazer jovens, entre os 15 e 18 anos, para as instituições onde trabalham investigadores em Física de Partículas Elementares e áreas afins. Nas Masterclasses, os estudantes trabalham com dados reais, adquiridos no Grande Colisor de Hadrões (LHC), no CERN, sendo solicitada a sua classificação por categorias, segundo o tipo de acontecimento. Para tal, os estudantes assumem o papel de cientistas e utilizam as mesmas ferramentas que os Físicos do CERN e do mundo inteiro. São Tomé e Príncipe, em parceria com o Laboratório de Instrumentação de Física Experimental de Partículas (LIP), tem participado nas Masterclasses desde 2012. De 2012 até 2014, a organização local das Masterclasses esteve a cargo do Instituto Superior Politécnico de São Tomé e Príncipe (ISP), que foi a primeira instituição pública de ensino superior no País. A partir de 2014 (data da criação da Universidade de São Tomé e Príncipe), a Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de São Tomé e Príncipe (FCT-USTP) passou a organizar a atividade. O programa local das Masterclasses integra várias palestras realizadas pelos professores de Física santomenses que tiveram a oportunidade de participar na Escola de Professores no CERN em Língua Portuguesa, desde 2010 até 2016. O presente artigo apresenta um breve panorama sobre a organização local, as escolas envolvidas, o programa local e sobre a atividade de análise de dados do detetor ATLAS.

Palavras-chave: Masterclasses de Física de Partículas, CERN, Detetor ATLAS.

EXTENDED ABSTRACT

International Masterclasses on Particle Physics is an event promoted by the European Organization for Nuclear Research (CERN) and aims to show young people between 15 and 18 years old the type of activities that are developed in Experimental Particle Physics. The fundamental idea of the annual

¹ Universidade de São Tomé e Príncipe, luciocarvalho77@hotmail.com

² Universidade de São Tomé e Príncipe, manuelpenhor@hotmail.com

program is to get students to “put on the skin” of a scientist and work like physicists in reality. Students and teachers are taken to universities and research centers where there are research groups focused on the study of High Energy Physics. There, they interact with scientists, attend lectures on the standard model, elementary particles, accelerators and particle detectors and carry out an activity of analysis of real data, acquired in the Large Collider of Hadrons (LHC), at CERN, being requested its classification by categories, according to the type of event. To simulate the real scientific work environment, Masterclasses end with videoconferences, in which groups of students from different institutes and countries connect with two moderators at CERN to combine and discuss the respective results. Students can also question the moderators in a question and answer session. Videoconferences usually end with a quiz on Particle Physics.

Currently, the central organization of the International Masterclasses in Particle Physics is led by the Technical University of Dresden, Germany, in a very close collaboration with the IPPOG group (International Particle Physics Outreach Group). The central organization defines the event calendar (which can be modified according to local needs or due to the time difference with CERN) and is responsible for conducting the video conference at the end of each meeting.

São Tomé e Príncipe, in partnership with the Laboratory of Instrumentation for Experimental Particle Physics (LIP), has participated, annually, since 2012, in the Masterclasses. From 2012 to 2014, the local organization of the Masterclasses was in charge of the Instituto Politécnico de São Tomé and Príncipe (ISP), which was the first public higher education institution in the country. From 2014 (date of the creation of the University of São Tomé e Príncipe), the Faculdade de Ciências e Tecnologias de São Tomé e Príncipe (FCT-USTP) started to organize the activity. For the activity, FCT-USTP annually receives more than 30 students from some secondary schools in the country, such as the Liceu Nacional, Escola Maria Manuela Margarido and Escola Portuguesa de São Tomé e Príncipe - CELP. The focal points in these schools (usually physics teachers who had the opportunity to participate in the Escola de Professores no CERN em Língua Portuguesa) select students from the 10th, 11th and 12th grades, especially motivated for the subject of Physics.

Annually, thanks to the support of LIP, a teacher of physics from São Tomé e Príncipe, from secondary school, participates in the Escola de Professores no CERN em Língua Portuguesa. From 2010 to 2019, seven teachers have already participated.

The program of the Escola de Professores no CERN em Língua Portuguesa includes pedagogical lectures and dissemination of what is done at CERN and visits to CERN experiences and laboratories, allowing secondary

school teachers to have contact with cutting-edge science and technology in the place where it develops.

The success of Masterclasses in São Tomé e Príncipe is a legacy of the Escola de Professores no CERN em Língua Portuguesa. Currently, teachers of physics from São Tomé e Príncipe, who participated in the training at CERN, play the role of tutors in Masterclasses and feel motivated to present the introductory lectures on the role of CERN and Modern Physics.

Key-words: Masterclasses on Particle Physics, CERN, ATLAS detector.

MASTERCLASSES INTERNACIONAIS DE FÍSICA DE PARTÍCULAS

Masterclasses Internacionais de Física de Partículas é um evento promovido pela Organização Europeia para a Investigação Nuclear (CERN) e tem como objetivo mostrar aos jovens entre 15 e 18 anos os tipos de atividades que são desenvolvidas na Física Experimental de Partículas. A ideia fundamental do programa anual é levar os estudantes a “vestir a pele” de um cientista e trabalhar como os físicos na realidade. Estudantes e professores são levados às universidades e centros de pesquisa onde existam grupos de pesquisa voltados para o estudo da Física de Altas Energias. Lá, eles interagem com cientistas, assistem a palestras sobre o modelo padrão, partículas elementares, aceleradores e detetores de partículas e realizam uma atividade de análise de dados reais, obtidos no Grande Colisor de Hadrões (LHC), no CERN, sendo solicitada a sua classificação por categorias, segundo o tipo de acontecimento. Para simular o ambiente de trabalho científico real, as Masterclasses terminam com videoconferências, em que grupos de estudantes de diferentes institutos e países se ligam a dois moderadores no CERN para combinar e discutir os respetivos resultados. Os estudantes podem também questionar os moderadores, numa sessão de perguntas e respostas. As videoconferências terminam geralmente com um questionário lúdico (*quiz*) sobre Física de Partículas.

Atualmente, a organização central das Masterclasses Internacionais em Física de Partículas é liderada pela Universidade Técnica de Dresden, na Alemanha, numa colaboração muito próxima com o grupo IPPOG (International Particle Physics Outreach Group). A organização central define o calendário do evento (que pode ser modificado de acordo com as necessidades locais ou devido à diferença de fuso horário com o CERN) e fica responsável pela realização da videoconferência no final de cada encontro.

MASTERCLASSES EM SÃO TOMÉ E PRÍNCIPE

São Tomé e Príncipe é um arquipélago formado por duas ilhas e ilhéus adjacentes, situado a oeste da costa africana, no Golfo da Guiné. O arquipélago compreende uma superfície total de 1.001 km². A ilha de São Tomé e os seus ilhéus totalizam 859 km² de superfície e a ilha do Príncipe e os seus ilhéus totalizam 142 km². As ilhas encontram-se separadas de cerca de 300 km da costa ocidental da África e situam-se entre os paralelos 1°45' Norte e 0°25' Sul e os meridianos 6°26' Este e 7°30' Oeste. São ilhas de origem vulcânica, com um relevo muito acidentado. Os pontos mais altos são o Pico de São Tomé (2.024 m), em São Tomé, e o Pico do Príncipe (948 m), no Príncipe. A população total é estimada em 197.700 pessoas, segundo os dados de 2017 do Instituto Nacional de Estatística de São Tomé e Príncipe.

São Tomé e Príncipe, em parceria com o Laboratório de Instrumentação de Física Experimental de Partículas (LIP), tem participado, anualmente, desde 2012, nas Masterclasses. De 2012 até 2014, a organização local das Masterclasses esteve a cargo do Instituto Superior Politécnico de São Tomé e Príncipe (ISP), que foi a primeira instituição pública de ensino superior no País. A partir de 2014 (data da criação da Universidade de São Tomé e Príncipe), a Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de São Tomé e Príncipe (FCT-USTP) passou a organizar a atividade. Para a atividade, a FCT-USTP recebe, anualmente, mais de 30 estudantes provenientes de algumas escolas secundárias do país, como, por exemplo, o Liceu Nacional, a Escola Maria Manuela Margarido e a Escola Portuguesa de São Tomé e Príncipe – CELP. Os pontos focais nessas escolas (geralmente professores de Física que tiveram a oportunidade de participar na Escola de Professores no CERN em Língua Portuguesa) seleccionam os alunos dos 10º, 11º e 12º anos de escolaridade, especialmente motivados para a disciplina de Física.

Em São Tomé e Príncipe, a agenda típica das Masterclasses é a seguinte:

7:30 – 8:00 (GMT) – Chegada dos participantes.

8:00 – 10:20 (GMT) – Palestras introdutórias na FCT-USTP. Apresentação sobre os objetivos da pesquisa, modelo padrão, métodos fundamentais (aceleradores e detetores), resultados da pesquisa em Física de Partículas e perguntas em aberto.

10:20 – 10:30 (GMT) – Intervalo.

10:30 – 11:00 (GMT) – Prática guiada com discussão (função do programa de exibição de eventos Hypatia, no caso do caminho Z. Exercícios de identificação de partículas e exercícios de classificação de eventos).

11:00 – 12:00 (GMT) – Análise de dados do detetor ATLAS.

12:00 – 13:00 (GMT) – Almoço.

13:00 – 14:00 (GMT) – Análise de dados do detetor ATLAS (Conclusão).

14:00 – 14:30 (GMT) – Discussão dos resultados.

14:30 – 15:00 (GMT) – Preparação da videoconferência.

15:00 – 16:00 (GMT) – Videoconferência (moderada pelo CERN).

16:00 – 16:15 (GMT) – Encerramento das atividades.

A ATIVIDADE DE ANÁLISE DE DADOS DO ATLAS

Um dos momentos altos das Masterclasses é a análise de dados do detector ATLAS realizada pelos alunos. Os tutores fornecem um conjunto de dados e uma folha de contagem a cada grupo de dois alunos. Cada par de estudantes analisa um conjunto com 50 eventos, usando o programa Minerva, no caso do caminho W, ou o Hypatia, no caso do caminho Z. Frequentemente, São Tomé e Príncipe segue o caminho Z.

No Hypatia, para cada colisão, os alunos tentam encontrar sinais da existência de partículas, tais como:

- um Bosão Z, J/ψ , Y, Gravitão ou Z' , procurando por um par de elétron-positrão ou um par múon-antimúon (e^+e^- ou $\mu^+\mu^-$);
- um bóson de Higgs ou Gravitão, buscando um par fóton-fóton ($\gamma\gamma$);
- um bóson de Higgs ou Gravitão, procurando dois pares de léptons ($e^+e^-e^+e^-$, $e^+e^-\mu^+\mu^-$, $\mu^+\mu^-\mu^+\mu^-$).

No Hypatia, os alunos definem um corte p_T mínimo de 5 GeV e usam as ferramentas de apontar e a informação das partículas para a tomada de decisão. Caso detetem os produtos de decaimento de uma das partículas acima referidas, escolhem as faixas ou objetos correspondentes e inserem-nos na tabela de invariante da massa do Hypatia. Depois de analisar todos os eventos, os alunos, com o apoio dos tutores, guardam a tabela de invariante da massa do Hypatia e submetem os dados, usando a página OPloT (<http://cernmasterclass.uio.no/OPloT>). Os dados ajudam a compor um histograma de massa. O gráfico reúne as análises realizadas por todos os participantes que estão realizando a atividade naquele dia das Masterclasses.

Após a submissão dos dados, os tutores realizam uma breve discussão dos resultados com os participantes. Nessa análise, são comparados os histogramas dos pares elétron-positrão e múon-antimúon, ressaltando diferenças, semelhanças, o significado dos picos e a quantidade de eventos candidatos do decaimento do Higgs.

A última fase da atividade de análise é a videoconferência mediada por pesquisadores no CERN. Nela, os mediadores combinam os dados submetidos num histograma resultante e discutem o resultado, comparando-o com uma distribuição de massa real obtida no ATLAS. Para encerrar a videoconferência, os mediadores do CERN abrem um espaço de perguntas e respostas e comandam um *quiz* sobre a Física de Partículas e sobre o CERN.

IMPACTO POSITIVO DA ESCOLA DE PROFESSORES NO CERN EM LÍNGUA PORTUGUESA

Anualmente, graças ao apoio do LIP, um professor de Física santomense, do ensino secundário, participa na Escola de Professores no CERN em Língua Portuguesa. Desde 2010 até 2019, sete professores já participaram.

O programa da Escola de Professores no CERN em Língua Portuguesa inclui palestras pedagógicas e de divulgação do que se faz no CERN e visitas às experiências e laboratórios do CERN, permitindo aos professores do ensino secundário terem contacto com a ciência e tecnologia de ponta no local onde ela se desenvolve.

O sucesso na realização das Masterclasses em São Tomé e Príncipe é um legado da Escola de Professores no CERN em Língua Portuguesa. Atualmente, os professores santomenses que participaram da formação no CERN desempenham o papel de tutores nas Masterclasses e sentem-se motivados para apresentar as palestras introdutórias sobre o papel do CERN e da Física Moderna.

REFERÊNCIAS

Instituto Nacional de Estatística – República Democrática de São Tomé e Príncipe. Disponível em: <<https://www.ine.st/index.php/>>. Acesso em: 17 mar. 2020

International Masterclasses – hands on particles physics. Disponível em: <<https://physicsmasterclasses.org/>>. Acesso em: 17 mar. 2020.

Garcia, N. M. D. (Org.). (2015). *Nós, professores brasileiros de física do ensino médio, estivemos no CERN*. São Paulo: Sociedade Brasileira de Física/Editora Livraria da Física.

PROGRAMA MEDEA – 10 ANOS A PROMOVER A LITERACIA EM CAMPOS MAGNÉTICOS E ELÉTRICOS DE BAIXA FREQUÊNCIA

MEDEA PROGRAM - 10 YEARS PROMOTING LITERACY IN LOW FREQUENCY MAGNETIC AND ELECTRICAL FIELDS

Horácio João Matos Fernandes¹
Liliana da Silva Jesuino²
David Martins Neto³
Manuel Bogarim Bento dos Santos⁴
Rúben Valentim Alves Cardoso⁵
Luis Miguel Teixeira Gaspar⁶

RESUMO

O projeto MEDEA tem como objetivo ampliar a consciência e conhecimento nos jovens sobre os efeitos para a saúde dos campos elétricos e magnéticos de baixa frequência. O seu ponto de partida foi o ano de 2008, no qual a Sociedade Portuguesa de Física – SPF, em parceria com as Redes Energéticas Nacionais S.A. – REN, iniciou um concurso nacional para os alunos do 10º ao 12º anos. Desde o seu início, o projeto MEDEA procura contrariar as teorias especulativas e infundadas que se geram em torno do desconhecimento científico.

Para atingir os seus objetivos, o projeto MEDEA seleciona todos os anos 25 escolas candidatas a quem faculta um aparelho de medição de campos magnéticos e elétricos de nível profissional. Nas escolas selecionadas, as equipas de alunos são desafiadas para produzir e comunicar conhecimento sobre os campos elétricos e magnéticos de baixa frequência no seu dia a dia e suas implicações para a saúde.

As diretrizes quanto a metodologias e análises de dados são afinadas de edição em edição, em conformidade com o retorno que pedimos aos professores das escolas. Mais recentemente o Projeto MEDEA passou a incluir um curso *on-line*, gratuito, a distância e de frequência livre, baseado no Open-edX na plataforma de MOOCs do Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa (IST-UL). A constante adaptação e a melhoria que a SPF tem imprimido ao projeto MEDEA garantem a procura dos alunos, que tem excedido sempre a oferta.

Palavras-chave: Campos Elétricos e Magnéticos, Interdisciplinaridade, Física e Sociedade, Medições em física, Transição Digital, Multimédia.

¹ IST-UL e IPFN, hf@ipfn.ist.utl.pt

² SPF e Agrupamento de Escolas Escultor Francisco dos Santos, liliana@spf.pt

³ IST-UL, david.m.neto@tecnico.ulisboa.pt

⁴ IST-UL, manuelbbsantos@tecnico.ulisboa.pt

⁵ IST-UL, ruben.cardoso@tecnico.ulisboa.pt

⁶ Agrupamento de Escolas de Benfica luis.gaspar@aebenfica.pt

EXTENDED ABSTRACT

The MEDEA project intends to measure the very low frequency (0 to 300 Hz) electric and magnetic fields produced by any equipment or electrical circuit and to compare the measured values with acceptable levels according to European Union standards. The project is the result of a partnership between SPF and REN – Redes Energéticas Nacionais S.A., the patron of the project. MEDEA is an acronym from the Portuguese name of the project: *MEDição dos campos Electromagnéticos no Ambiente*.

The project involves the simultaneous participation of several educational institutions, each one with at least one team and a teacher tutor, where training is combined with the application of scientific knowledge and the development of critical and autonomous thinking skills, collaborative work and communication skills. Students are encouraged to take field measurements at school, in their home environment and in the vicinity of power lines. In addition, they are encouraged to search for scientifically credible information about the possible effects of these fields on human health.

The MEDEA Project selects 25 candidate schools every year. Schools participating in MEDEA receive an electric and magnetic field measuring device for very low frequencies, which they must use during the development of the project. The teams are challenged to produce and communicate knowledge about low-frequency EMFs in their daily lives and their health implications. SPF provides on its site all the information necessary for the implementation of the project, in particular: the equipment user's manual, a frequently asked questions (FAQ) section permanently updated and several useful links.

In recent years, the MEDEA project started to include a free, online, course based on the MOOCs platform of the Instituto Superior Técnico of the University of Lisbon (IST-UL).

The course consists of an introduction to experimental physics, where participants explore data analysis and experimental error treatment while carrying out experiments on electromagnetism built with commonplace materials and using the e-lab (remotely accessible laboratory), as well as an introduction to numerical adjustment techniques of functions to the theoretical models that describe them.

The constant adaptation and improvement of the MEDEA project by SPF is a guarantee of student demand, which has always exceeded the offer.

The teams participating in MEDEA are requested to create a website dedicated to the MEDEA project. On this website they present all the results obtained, research carried out and other relevant information. The evaluation of the teams at the end of the project is exclusively based on the content of the respective internet pages.

There is not a predefined format for the websites. Instead, the project welcomes the creativity of the teams, combined with scientific rigor and an efficient communication of MEDEA's objectives/results to society. The MEDEA project, in its 10 editions, has already involved more than 200 teachers and 2500 students.

The awards ceremony takes place during the biennale National Physics Conferences. The main motivation for the involvement of the participating schools is the success and impact of the prize-giving sessions and the great visibility and promotion of MEDEA and its results, not only in the Physics Education community but also in the scientific and academic community.

In the years when the National Conference doesn't occur, the awarding ceremony takes place in the schools of the winning teams and aims to disseminate the project to the educational communities: teachers, education council, parents, friends and, above all, 15-18 years old students (the main target of the project) leading to a fruitful interaction between society in general, the school, the scientific and business community, science disseminators, journalists and other interested partners. The project, the winning team and the award ceremony itself are always highlighted in the local press.

Keywords: Electrical and magnetic fields, Interdisciplinarity, Physics and society, Measurements in Physics, Digital transformation, Multimedia.

INTRODUÇÃO

O projecto MEDEA, acrónimo de MEDição de campos Eléctricos e magnéticos no meio Ambiente, visa medir os campos eléctricos e magnéticos (CEM) (Barroso, 2008) de muito baixa frequência (0 a 300 Hz) que são produzidos por qualquer equipamento ou circuito eléctrico e fazer a comparação desses valores com os níveis ambientais aceitáveis de acordo com as normas da União Europeia (SCENIHR, 2007).

O MEDEA consiste na participação simultânea de várias instituições de ensino, cada uma com uma ou mais equipas e um professor responsável, onde se combina a formação com a aplicação de conhecimentos científicos presentes nas aprendizagens essenciais e o desenvolvimento de capacidades de pensamento crítico e autónomo, competências de trabalho colaborativo e capacidade de comunicação.

Em particular, os alunos vão ser encorajados a efectuar medições destes campos ambientes na escola, no seu ambiente doméstico e na vizinhança de linhas de transporte e subestações de energia eléctrica. Para além disso, serão encorajados a procurar informação cientificamente credível sobre os eventuais efeitos destes campos na saúde humana. O registo das medições e o tratamen-

to dos dados adquiridos são uma componente de destaque, cuja análise será confrontada com os valores de referência.

Os motivos que levaram a SPF a iniciar o Projeto MEDEA em 2008 mantêm-se atuais e pertinentes após 10 edições: (i) aproximar os alunos da Física enquanto uma ciência experimental; (ii) aumentar a proficiência dos alunos nas práticas de investigação das ciências experimentais, em particular da Física; (iii) desenvolver as capacidades de comunicação de resultados em ciência, com recurso a meios digitais e multimédia; (iv) promover o trabalho em equipa com respeito pelos pares; (v) a interdisciplinaridade, nomeadamente entre a Física, a Medicina e a Biologia; (vi) aumentar o conhecimento sobre os campos magnéticos e elétricos de baixa frequência a que estamos expostos com maior frequência; (vii) investigar sobre as consequências que os campos magnéticos e elétricos de baixa frequência possam ter sobre a nossa saúde.

IMPLEMENTAÇÃO

O Projeto iniciou-se no ano letivo de 2008/2009, com a participação de dez escolas da zona da grande Lisboa, adquiriu-se material em especial dez medidores marca SPECTRAM modelo NF-5010 (www.aaronia.de). Foram em dois anos adquiridos 30 unidades para permitir que o projeto se desenvolvesse em escolas espalhadas por todo o País. Nos primeiros anos, o apoio a alunos e professores era dado por meio do acesso ao Projeto Faraday (faraday.fc.up.pt/Faraday/Michael_Faraday.html). Os primeiros impactos do projeto foram alvo de uma apresentação em conferência (Abreu et al., 2010).

Para atingir os seus objetivos, o Projeto MEDEA seleciona todos os anos 25 escolas candidatas a quem faculta um aparelho de medição de campos magnéticos e elétricos de nível profissional. As escolas participantes no MEDEA recebem um medidor de campo elétrico e magnético, para muito baixas frequências, que devem usar durante o desenvolvimento do projeto. Nas escolas selecionadas as equipas de alunos são desafiadas para produzir e comunicar conhecimento sobre os CEM de baixa frequência no seu dia a dia e suas implicações para a saúde. A SPF, no portal, disponibiliza toda a informação necessária à implementação do projeto, em particular: o manual de utilização do equipamento, uma área de questões frequentes (FAQ) em actualização permanente e várias ligações úteis.

Ao longo das dez edições do MEDEA tem havido constante evolução e melhoria, as orientações disponibilizadas vêm sendo clarificadas e quando necessário traduzidas para português (<https://medea.spf.pt>). As diretrizes quanto a metodologias e análises de dados são afinadas de edição em edição; em conformidade com o retorno que pedimos aos professores das escolas, o acompanhamento próximo tem sido reforçado. Mais recentemente o Projeto MEDEA passou a incluir um curso *on-line*, gratuito, a distância e de frequên-

cia livre, baseado na plataforma de MOOCs do Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa (IST-UL) (Fernandes, 2017). A constante adaptação e melhoria que a SPF tem impresso ao projeto MEDEA são um garante da procura dos alunos, que tem excedido sempre a oferta.

O MOOCfeX/E-LAB

O MOOCfeX/e-lab é um curso preparatório para o MEDEA produzido pelo IST com o apoio da SPF. O curso, ministrado pelo coordenador do MEDEA, pretende proporcionar uma melhor preparação dos alunos para as medições dos campos eletromagnéticos, bem como preparar os participantes para os procedimentos e metodologias empregues na física experimental. O curso, exclusivamente *on-line* e de funcionamento aberto (MOOC), na temática do eletromagnetismo e das medições experimentais, é de frequência facultativa e verifica-se que entre as equipas premiadas nas várias edições existiam alunos que tinham terminado ou frequentado o curso.

O curso consiste numa introdução à Física Experimental, onde os participantes poderão explorar a análise de dados, o tratamento dos erros experimentais e sua propagação nas equações empregues. O curso proporciona duas experiências de eletromagnetismo, sendo que uma delas é realizada com materiais correntes (Fernandes, 2018) e a segunda com recurso ao e-lab (laboratório acessível remotamente). Os participantes exploram ainda técnicas numéricas de ajuste de funções aos modelos teóricos que descrevem as experiências efetuadas. É dada particular ênfase precisamente às competências na análise de dados experimentais e na definição de critérios para a aceitação de um modelo teórico proposto na interpretação de uma experiência de eletromagnetismo, face aos dados experimentais obtidos.

DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

As equipas participantes no MEDEA são convidadas a criar uma página na internet dedicada ao projeto MEDEA, onde apresentam todos os resultados obtidos, pesquisas efetuadas e outras informações. As páginas devem ainda conter informações básicas, como o nome da equipa, o nome dos seus elementos e o nome dos responsáveis. As equipas são avaliadas exclusivamente nos conteúdos das respetivas páginas internet. Nessa página internet, as equipas incluem um relatório de progresso, sensivelmente a meio do desenvolvimento do projeto. Com este relatório de progresso, pretende-se que cada equipa elabore um trabalho multimédia (vídeo, filme, animação PowerPoint, etc.) sobre o estado de desenvolvimento do seu projeto MEDEA (podendo apresentar resultados científicos, entrevistas a colegas ou ao público em geral, tertúlias sobre o MEDEA, minipalestra na escola ou outro local, apresentação de in-

quéritos, etc.). Este relatório não apresenta, portanto, um formato definido e preferencial, mas apela-se à criatividade das equipas em conjunto com o rigor científico e a divulgação dos objetivos/resultados do MEDEA para a sociedade.

RESULTADOS E IMPACTO

O projeto MEDEA, ao longo das suas dez edições, já envolveu mais de 200 professores e 2.500 alunos. Em todas as edições, os projetos finais são avaliados por um júri, composto por elementos coordenadores do projeto, da SPF e da REN, e são selecionadas uma equipa vencedora e duas menções honrosas. A entrega dos prémios das edições MEDEA realiza-se durante as Conferências Nacionais de Física e os Encontros Ibéricos para o Ensino da Física, que se realizam cada dois anos. A motivação principal relaciona-se com o sucesso e o impacto da sessão de entrega de prémios e a grande visibilidade e promoção do MEDEA e seus resultados, não só na comunidade do Ensino da Física, mas também na comunidade científica e académica, dado o elevado número de participantes (cientistas, professores e alunos universitários e do ensino secundário, divulgadores de ciência, jornalistas, outros interessados). Ocorrem ainda sessões de divulgação do projecto MEDEA: a presença de uma bancada-MEDEA contando com a presença de alunos universitários voluntários/membros das equipas vencedoras, e palestras curtas sobre o projeto por exemplo durante a Noite Europeia dos Investigadores.



FIGURA 1. Entrega de Prémios – FÍSICA 2016 com o Nobel A. McDonald ao meio.



FIGURA 2. Alunos de Lagos e de V.N. Famalicão, na Física 2018, com o Nobel M. Korterlitz e o representante da REN, Dr. J. P. Abrantes.

Nos anos em que Portugal não é o país anfitrião do Encontro Ibérico para o Ensino da Física, a entrega dos prémios às equipas ocorre nas respetivas escolas e tem como objetivo a divulgação do projeto junto às comunidades educativas: professores, vereação da educação, pais, amigos e sobretudo dos alunos entre os 15 e os 18 anos (os principais visados nesta iniciativa), levando a um profícuo convívio entre a sociedade em geral, a escola, a comunidade científica e a empresarial, divulgadores de ciência, jornalistas e outros interessados. O projeto, as equipas vencedoras e a respetiva entrega de prémios têm sempre destaque na imprensa local.

AGRADECIMENTOS

Os autores David Neto e Manuel Santos agradecem o apoio da REN para participarem na 3ª Conferência de Física dos Países de Língua Portuguesa em São Tomé.



FIGURA 3. MEDEA10. Divulgação dos vencedores e menções honrosas na imprensa local.

REFERÊNCIAS

- Abreu, M. C. et al. (2010). MEDEA: transdisciplinaridade entre física, ensino e sociedade. *Actas de FISICA2010*. p. 263-264.
- Barroso, A. (2008). Campo Elétrico no meio ambiente. *Gazeta de Física*, 31(3), 29-30.
- Fernandes, H. (2017). https://courses.mooc.tecnico.ulisboa.pt/courses/coursev1:IST+feX_Mag3D+2017/
- Fernandes, H. (2018). Medida horizontal do campo magnético terrestre. *Gazeta de Física*, 40(3/4), 47-49.
- Kodama, K. (2009). A simple demonstration of a general rule for variation of magnetic field with distance. *Physics Education*, 44(3).
- SCENIHR. (2007). Possible effects of Electromagnetic Fields (EMF) on human health, https://ec.europa.eu/health/ph_risk/committees/04_SCENIHR_o_007.pdf.

ENERGIA

PERSPECTIVAS DE USO PRÁTICO DO EFEITO TERMOVOLTAICO DE KAMINSKII

PROSPECTS FOR PRACTICAL USE OF KAMINSKII THERMOVOLTAIC EFFECT

Pascoal António Mussuco Napoleão¹
Anatoly Vinogradov²

RESUMO

O efeito descoberto por Kaminskii V. V. em 1999 representa um dos novos princípios da transformação da energia térmica em eléctrica. Observou-se no monossulfeto de samário os resultados de investigação do efeito tensorresistivo, os quais foram apresentados na 1ª CP-CPLP. A sensibilidade tensorresistiva foi máxima entre todos os semicondutores. É feita análise teórica qualitativa das propriedades formidáveis de SmS a partir de relações entre energia de ionização das impurezas e os potenciais de ionização e raios iónicos, que são mais favoráveis nos elementos das terras raras. Isso explica-se pela presença nos átomos das 4-f camadas electrónicas, que têm a densidade máxima dos electrões. Essa exclusividade determina a área mais racional das aplicações práticas dos semicondutores das terras raras em qualidade dos elementos sensíveis dos transdutores das grandezas físicas de tipo resistivo. No efeito termovoltáico, as amostras situadas no campo de temperatura sem gradiente geram a força electromotriz. A natureza do efeito é relacionada com a variação da valência de íões de Sm e com o gradiente da concentração das impurezas nas amostras. É dada a comparação dos parâmetros do efeito de Kaminskii e do efeito termoeléctrico clássico de Seebeck. Entre eles, os valores máximos do rendimento dos termoelementos são 36% e 10%, respectivamente. O efeito termovoltáico, em virtude da sua eficiência energética, ausência da necessidade da criação do gradiente de temperatura no elemento de trabalho do transdutor, pureza ecológica e possibilidade da utilização das fontes de energia térmica secundárias não especializadas, tem altas perspectivas de uso prático. Os resultados obtidos explicam-se pelas causas fundamentais relacionadas com a posição dos elementos de terras raras na tabela periódica de elementos de Mendeleev.

Palavras-chave: Semicondutores de terras raras, Efeito termovoltáico.

EXTENDED ABSTRACT

Thermovoltáic effect discovered by Kaminskii V.V. with colleagues in 1999, represents one of the new principles for converting thermal energy into electrical energy. Samarium monosulfide (SmS) samples located in a uniform

¹ Universidade Agostinho Neto, Luanda, Angola, pascoalnapol@gmail.com

² Universidade Agostinho Neto, Luanda, Angola, vinluan@mail.ru

temperature field without any temperature gradient generated an electromotive force.

The results of a study of the tensorial effect discovered by Kaminskii V. V. and one of the authors of this report in this rare-earth semiconductor were presented earlier at the first CPLP physics conference. SmS had the highest tensor sensitivity among all semiconductor materials.

A qualitative theoretical analysis of the remarkable properties of samarium monosulfide and other rare-earth semiconductors was carried out on the basis of consideration of their features arising from the position of rare-earth elements in the periodic table of elements.

The value of the ionization potential of an impurity element should be considered the most important parameter for the transition of an electron to a free state (conduction band) in semiconductors. This follows from the fact that, with a rough estimate of the depth of the impurity donor level in the semiconductor material, they are proportional. Consideration of the second and third ionization potentials of the elements of the periodic system showed that rare-earth elements have the lowest values of ionization potentials. We can draw a conclusion that a rare-earth element introduced into the matrix from some compound will give its electron most easily in comparison with all other elements. In semiconductors, the electron will fall into the conduction band and lead to the appearance of effects associated with such a transition. The reason of the smallness of ionization potentials in comparison with other elements may be due to the fact that the ions of rare-earth elements have the largest sizes of ionic radii. Large radii of atoms and ions of rare-earth elements are related with the presence of electrons localized on 4f shells. These shells are located most closely to the nucleus of the element, and their electrons substantially screen the Coulomb potential of the nucleus, which leads to an increase in the ionic radius.

The described feature of the properties of rare-earth compounds allows us to determine the range of the most appropriate practical applications of rare-earth semiconductors. Since the rare-earth ion in these compounds most easily gives its electron under various external influences, these materials can be used as sensitive elements in the manufacture of sensors of various physical quantities of the resistive type (mechanical, thermal and gas sensors), as well as in converters of various types of energy into electrical energy. Samarium monosulfide is of greatest interest in this regard, since 4f levels of the samarium ion in this semiconductor are localized in the forbidden band most closely to the bottom of the conduction band (~ 0.2 eV) among other rare-earth semiconductors.

The nature of the thermovoltaic effect is associated with a change in the valency of defective Sm ions in vacancies of the sulfur sublattice, $\text{Sm}^{2+} \rightarrow \text{Sm}^{3+} + e^-$. In this case, the electrons pass from the 4f levels to the conduction band

and create large local concentrations of charge carriers. Such electron transitions are collective. Electron transitions are accompanied by the appearance of electrical voltage pulses and synchronized with them thermal processes. The effect of emf generation in SmS was observed when samples were heated to a temperature of 470 K. At higher temperatures, impurity levels with the activation energy of 0.04 eV are depleted, which concentration gradient in terms of sample volume causes the presence of thermovoltáic effect. The following characteristics of the effect were achieved on bulk SmS samples: an emf of 2.5 V in pulse mode with pulse duration of 1.3 s and emf of 0.05 V in continuous mode.

The comparison of the already achieved values of the parameters of thermoelements based on the Kaminskii effect and on the basis of the classical thermoelectric Seebeck effect was carried out. Maximum values of the efficiency were 36 % and 10 %, respectively. Thus, the thermovoltáic effect, due to its energy efficiency, unnecessary to create a temperature gradient on the working element of the converter, environmental cleanliness and the possibility of using associated heat sources, deserves close attention of researchers. A further increase in the conversion characteristics based on the concerned effect is associated with the working formula of the generation voltage of the effect and can be carried out by increasing the maximum working temperature and by developing effective technological methods for obtaining higher concentration gradients of impurity donor levels in the volume of the generating element.

Assessing the prospects for improving the parameters of thermoelements and their practical the prospects for improving the parameters of thermoelements and their practical use as quite high, the Kaminskii effect can be considered as an effective method of converting thermal energy into electrical energy already on the basis of the results achieved. This reflects the current trend of the transition to environmentally friendly and resource-saving energy. The maximum effect is obtained on SmS. Such results cannot be achieved using the compounds of other elements for fundamental reasons related to the structure of the electronic shells of rare-earth elements, which fact is reflected in their location in the periodic table.

Key-words: Rare-earth semiconductors, thermovoltáic effect.

ENERGIA

PARTICULARIDADES DOS SEMICONDUTORES DAS TERRAS RARAS

Na 1ª Conferência de Física da CPLP (Comunidade dos Países de Língua Portuguesa), foram apresentados os resultados da investigação do efeito

tensorresistivo num semiconductor das terras raras, o monossulfeto de samário (SmS), descoberto com os autores de comunicação (Vinogradov & Kaminskii, 2010). A sensibilidade tensorresesistiva foi máxima entre todos os materiais semicondutores (o coeficiente tensorresesistivo teve valor de 850 à temperatura 77 K e mais de 200 à temperatura do meio ambiente). Propriedades admiráveis do monossulfeto de samário revelam-se em um efeito absolutamente novo, descoberto por Kaminskii V. V. com colegas em 1999 (Kazanin, Kaminskii & Solov'ev, 2000) –efeito termovoltáico.

O SmS pertence à classe dos semicondutores das terras raras, isto é, compostos dos elementos das terras raras que possuem as propriedades semicondutoras. As propriedades dos semicondutores das terras raras foram descritas em artigo (Kaminskii & Sharenkova, 2018). Tratamos de explicar no nível qualitativo as particularidades dos compostos dos elementos das terras raras e dos semicondutores das terras raras não entrando em pormenores e não focalizando a atenção em alguns detalhes e excepções da tendência principal que se encontram no caminho de tal exposição do problema.

Nos semicondutores como o parâmetro mais importante para transição do electrão no estado livre (em banda de condução), é necessário considerar o valor do potencial de ionização (I) do elemento. Isso segue-se da matéria teórica (Ioffe, 1957) em que a avaliação aproximada da profundidade do nível da impureza doadora no material semiconductor é dada por $E_i = I/\epsilon^2$, onde ϵ é a permeabilidade dieléctrica do material. Consideremos os potenciais de ionização dos elementos da Tabela periódica. Visto que nós não analisamos os elementos, mas analisamos os compostos, que consistem de iões, ficamos interessados somente nos valores do segundo (I_2) e terceiro (I_3) potenciais de ionização (o primeiro tem razão para os átomos). Além disso, não consideramos os elementos, que não representam nenhum interesse para fabricação dos materiais praticamente aplicáveis. Esses são, antes de mais nada, os elementos radioactivos com o número atómico $Z \geq 83$ e gases nobres. O segundo e o terceiro potenciais de ionização praticamente de todos os elementos da Tabela periódica são apresentados nas Figuras 1 e 2. Como vemos, os elementos das terras raras têm os valores menores de potenciais de ionização em comparação com os outros elementos. A partir disso, podemos concluir que o elemento das terras raras implantado em matriz de qualquer composto (não obrigatoriamente semiconductor) vai libertar mais facilmente seu electrão em comparação com os outros elementos. Nos semicondutores, o electrão aparece na banda de condução e leva ao surgimento dos efeitos relacionados com essa transição.

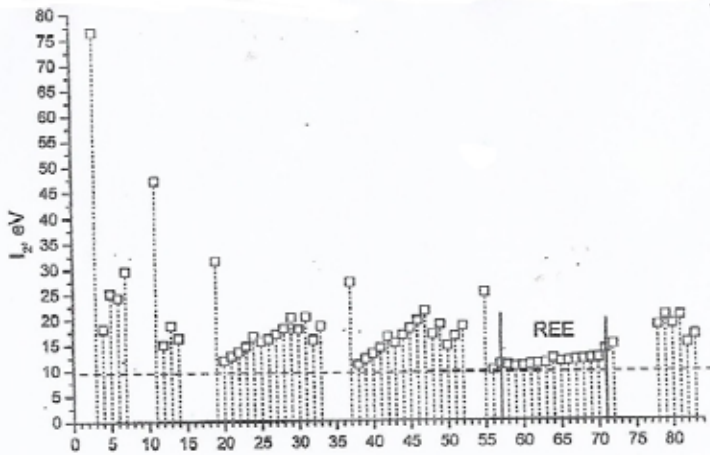


FIGURA 1. Dependência do segundo potencial de ionização de número atômico.
REE – rare-earth elements (elementos das terras raras).

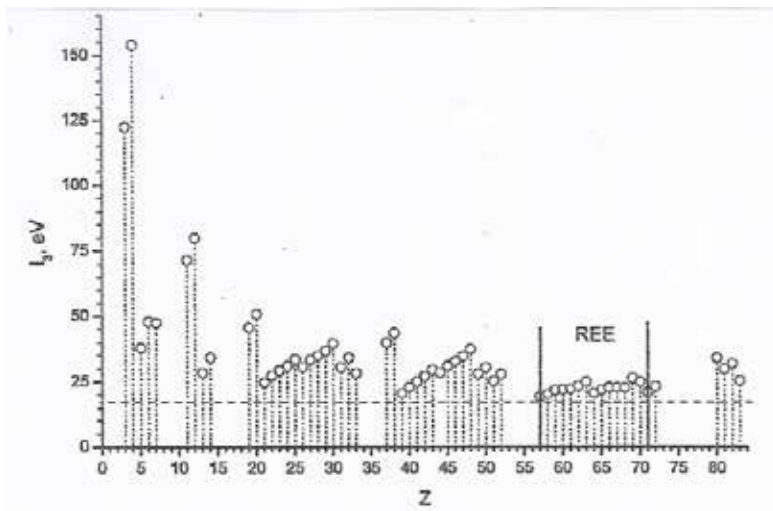


FIGURA 2. Dependência do terceiro potencial de ionização de número atômico.
REE – rare-earth elements (elementos das terras raras).

A causa do valor pequeno dos potenciais de ionização em comparação com os outros elementos pode ser explicada pelo facto de que os iões dos elementos das terras raras têm maiores valores dos raios iónicos (olhe, por exemplo, estes para os iões trivalentes na Figura 3). Isso está em correspondência com a tendência geral da diminuição dos potenciais de ionização com o aumento dos raios dos átomos (r_0) de vários elementos apresentada na Figura 4. O mesmo observa-se para os iões (r^{3+}). Grandes raios dos átomos e iões dos elementos das terras raras são relacionados com a presença dentro dos

átomos dos electrões localizados nas 4f-camadas. Essas camadas ficam mais próximas ao núcleo do átomo do elemento e seus electrões em grau essencial blindam o potencial coulombiano do núcleo, que leva ao aumento do raio iónico. Na Figura 5, na qualidade de um exemplo, é mostrada a distribuição radial da densidade de carga para 4f-, 5s-, 5p- e 6s-electrões do ião Gd^{3+} (Taylor & Darby, 1972). Como vemos, 4f-camada tem a densidade máxima dos electrões e eles estão situados mais próximos ao núcleo ($r = 0,3 \text{ \AA}$). Assim, a existência da 4f-camada determina a exclusividade das propriedades dos semicondutores das terras raras.

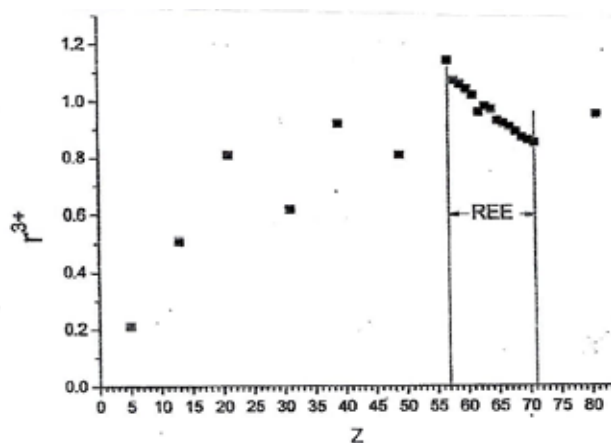


FIGURA 3. Dependência dos raios de íons trivalentes de número atômico.
REE – rare-earth elements (elementos das terras raras).

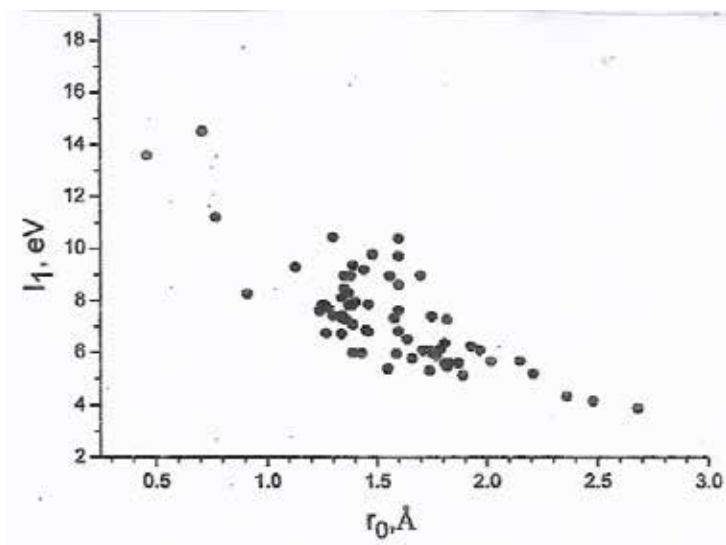


FIGURA 4. Dependência do primeiro potencial de ionização de raio atômico.

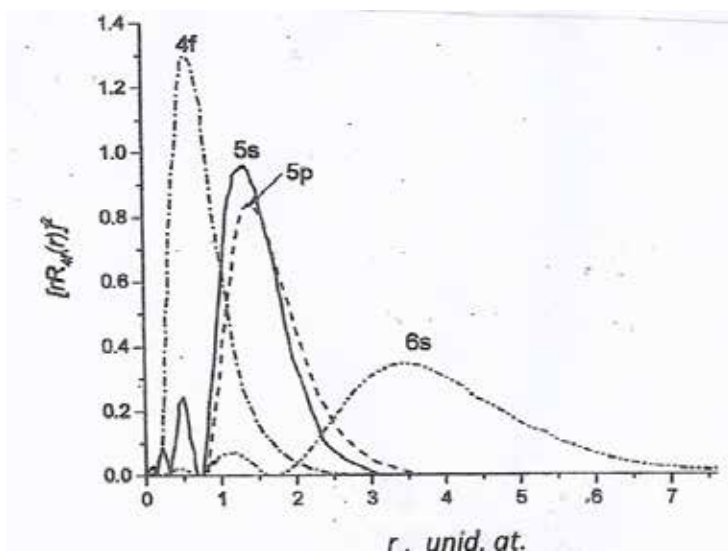


FIGURA 5. Distribuição radial da densidade de carga para 4f-, 5s-, 5p- e 6s-elétrons do íon Gd^{3+} .

EFEITO TERMOVOLTAICO

Descrita particularidade das propriedades dos compostos das terras raras permite determinar a área mais racional de aplicações práticas dos semicondutores das terras raras. Sendo que o íon das terras raras nesses compostos mais facilmente deixa sair o seu electrão à presença de várias acções externas, esses materiais podem ser usados em qualidade dos elementos sensíveis à fabricação dos transdutores das grandezas físicas do tipo resistivo (sensores mecânicos, térmicos e de gás) e também conversores de vários tipos de energia em eléctrica. O monossulfeto de samário (SmS) representa o maior interesse neste sentido, visto que neste semiconductor os 4f-níveis do íon de samário são localizados em zona proibida ao máximo próximo para o fundo da banda de condução ($\sim 0,2$ eV) em comparação com outros semicondutores das terras raras.

O efeito termovoltáico representa um dos novos princípios de transformação da energia térmica em energia eléctrica. As amostras de SmS colocadas no campo homogêneo de temperatura (Figura 6) geraram a força electromotriz. O exemplo do sinal gerado durante um período de tempo de mais de 5 horas é mostrado na Figura 7. A natureza do efeito está relacionada com a variação da valência dos íões de defeito de Sm, que ficam nas vacâncias da sub-rede de enxofre, $Sm^{2+} \rightarrow Sm^{3+} + e^-$. Com isso, os electrões passam de 4f-níveis para a banda de condução e criam grandes concentrações locais de portadores de carga. Tais transições de electrões têm um caracter colectivo.



FIGURA 6. Modelo do transdutor termoelectrico com base no efeito termovoltaiico em SmS.

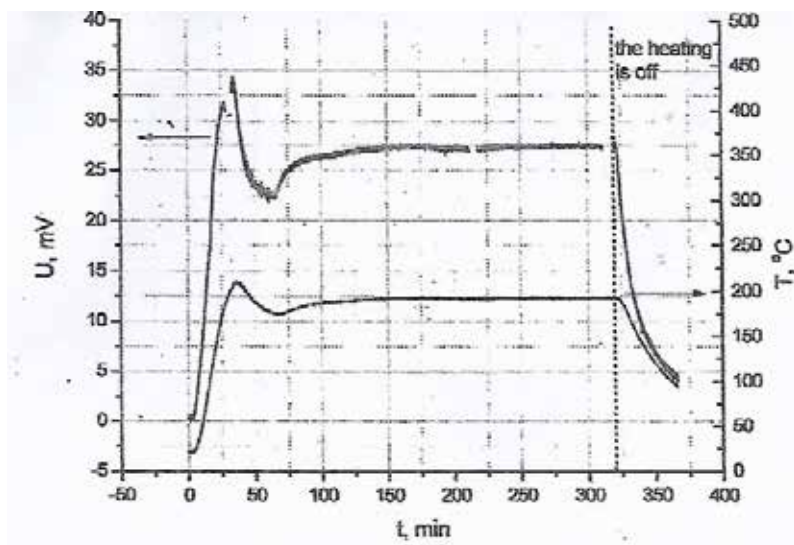


FIGURA 7. Sinal gerado no regime estacionário do efeito termovoltaiico e respectivas temperaturas do termoelemento de SmS durante tempo maior que 5 horas.

As transições de electrões são acompanhadas com o surgimento dos impulsos da tensão eléctrica e sincronizados com esses processos térmicos. O efeito de geração da força electromotriz em SmS observou-se durante o aquecimento das amostras até a temperatura de 470 K. Às temperaturas mais altas tem lugar o esgotamento dos níveis de impureza com a concentração de

N_i e energia de activação de 0,04 eV, gradiente de concentração dos quais, no volume de amostra e respectivo gradiente de concentração dos electrões livres, provoca o surgimento do efeito termovoltáico

$$E = K \cdot \text{grad} N_i, \quad (1)$$

onde E é a intensidade do campo eléctrico gerado. O coeficiente do efeito K , de modo complexo, depende da temperatura e dos seguintes parâmetros do semiconductor: massa efectiva, permeabilidade dieléctrica, energia de activação e concentração dos níveis de doadores e também do mecanismo de espalhamento dos electrões de condução. Por isso, o valor de K precisa de uma determinação empírica (Kaminskii, Golubkov & Vasil'ev, 2002).

CARACTERÍSTICAS E PERSPECTIVAS DO USO DO EFEITO DE KAMINSKII

Nas amostras volumétricas de SmS foram obtidas as seguintes características do efeito: a força electromotriz de valor de 2,5 V no regime de impulso com a sua duração de 1,3 s e a força electromotriz de valor de 0,05 V no regime contínuo (Kaminskii & Solov'ev, 2001). As medições directas do rendimento do termoelemento com base no efeito termovoltáico mostraram o valor de 28 % (Egorov, Kaminskii, Kazanin, Solov'ev & Golubkov, 2013). Posteriormente, foram atingidos os valores do rendimento até 36 %. Isso significativamente supera o valor do rendimento do efeito clássico termoelectrico de Seebeck, que não excede 10 %. Deste modo, o efeito termovoltáico em virtude da sua eficiência energética, a ausência da necessidade da criação do gradiente de temperatura no elemento de trabalho do transdutor, a pureza ecológica e a possibilidade da utilização das fontes de energia térmica não especializadas colaterais merece a atenção acrescida dos investigadores.

Posteriormente, o efeito termovoltáico foi descoberto também nos outros materiais semicondutores: ZnO, Ge, Si e vários semicondutores dos compostos complexos. Entretanto, o valor de tensão gerado neles foi menor que em SmS. A elevação posterior das características da transformação com base no efeito considerado está relacionada com a fórmula de trabalho da força electromotriz do efeito (Kaminskii, Soloviev, Sharenkova, Hirai & Kubota, 2018):

$$U = \frac{kT}{e} \ln \frac{n_2}{n_1}, \quad (2)$$

onde T é a temperatura de trabalho de geração e n_1 e n_2 as concentrações dos electrões de condução nos espaços em proximidade dos contactos do gerador. A temperatura máxima para o processo de geração determina-se pela posição

dos níveis energéticos do ião doador. Quanto mais profundo ficam os níveis de doadores, à maior temperatura eles esgotam-se e até maiores temperaturas é possível o processo da geração da força electromotriz por conta do efeito termovoltáico. Por exemplo, em SmS dopado com iões de Sm a geração ocorre até $T = 470$ K. Para baixar os níveis de doadores é necessário fabricar as soluções sólidas $\text{Sm}_{1-x}\text{Eu}_x\text{S}$, nas quais a energia de activação da condutibilidade por impurezas aumenta de 0,04 até 0,4 eV na variação de x de 0 até 1 (Kaminskii, Kazanin, Romanova, Kamenskaya & Sharenkova, 2016). Também podem ser usadas as soluções sólidas $\text{SmSe}_x\text{S}_{1-x}$, $\text{Sm}_{1-x}\text{Yb}_x\text{S}$ e algumas outras, que baixam os níveis de doadores. O segundo sentido do aumento da tensão da geração, de acordo com as fórmulas (1) e (2), pode ser relacionado com a elaboração dos métodos tecnológicos efectivos da obtenção dos gradientes mais altos das concentrações dos níveis das impurezas doadoras no volume do elemento gerador.

Avaliando as perspectivas do melhoramento dos parâmetros dos termoelementos como bastante altas, já com base nos resultados conseguidos apresentados na tabela, o efeito de Kaminskii pode ser considerado como um método efectivo da transformação da energia térmica em eléctrica, que reflecte a tendência moderna da transição para energética ecologicamente pura e de economia de recursos. O efeito máximo foi obtido em SmS (Kaminskii, Kazanin, Kazakov, Grevcev & Sharenkova, 2017). É impossível conseguir tais resultados, como foi mostrado acima, nos compostos de outros elementos pelas causas fundamentais relacionadas com a estrutura das camadas electrónicas dos elementos das terras raras, o que tem a sua reflexão na posição dos elementos das terras raras na Tabela periódica dos elementos de Mendeleev.

TABELA 1. Resultados máximos obtidos

Parâmetro	Termoelemento com base no efeito de Kaminskii	Termoelemento com base no efeito de Seebeck
Potência gerada específica, W/g	até 1,8	$\leq 0,2$
Tensão gerada com um termoelemento, V	até 5	$\leq 0,1$
Resistência interna, Ω	$0,2 \div 2$	$0,2 \div 2$
Estabilidade à radiação dos parâmetros eléctricos, dose de exposição até a variação do parâmetro por 1%, 10^9Roentgen	10	1
Potência máxima obtida de um termoelemento, W	5 mW	unidades de W
Rendimento máximo, %	até 36	até 10

REFERÊNCIAS

- Egorov, V. M., Kaminskii, V. V., Kazanin, M. M., Solov'ev, S. M. & Golubkov, A. V. (2013). Rendimento da transformação da energia térmica em energia eléctrica por conta do efeito termovoltáico. *Technical Physics Letters*, 39, 650-652.
- Ioffe, A. F. (1957). *Física dos semicondutores*. Moscovo-Leningrad: Ed. Acad. Ciências URSS.
- Kaminskii, V. V. & Solov'ev, S. M. (2001). Fem induzida pela variação da valência do íão de samário como o resultado da transição de fase em monocristais de SmS. *Phys. Solid State*, 43, 439-442.
- Kaminskii, V. V., Golubkov, A. V. & Vasil'ev, L. N. (2002). Iões de samário de defeitos e geração da força electromotriz em SmS. *Phys. Solid State*, 44, 1574-1578.
- Kaminskii, V. V., Kazanin, M. M., Romanova, M. V., Kamenskaya, G. A. & Sharenkova, N. V. (2016). Parâmetros eléctricos dos policristais dos semicondutores das terras raras $\text{Sm}_{1-x}\text{Eu}_x\text{S}$. *Semiconductors*, 50, 1141-1144.
- Kaminskii, V. V., Kazanin, M. M., Kazakov, S. A., Grevcev, M. A. & Sharenkova, N. V. (2017). Processo de fabricação do gerador termoeléctrico. Patente para invenção da Federação Russa Nº 2628677 (requisição Nº 2016107499). Prioridade desde 01/03/2016. Prazo de acção da patente até 01/03/2036. *Boletim* Nº 24.
- Kaminskii, V. V. & Sharenkova, N. V. (2018). Particularidades das propriedades dos semicondutores das terras raras. *Física e Técnica dos Semicondutores*, 53, 158-160.
- Kaminskii, V. V., Solov'ev, S. M., Sharenkova, N. V., Hirai, S. & Kubota, Y. (2018). Efeito termovoltáico em sesquisulfeto de cério. *Technical Physics Letters*, 44, 1087-1088.
- Kazanin, M. M., Kaminskii, V. V. & Solov'ev, S. M. (2000). Força electromotriz térmica anómala em monossulfeto de samário. *Technical Physics*, 45, 659-661.
- Taylor, K. N. R. & Darby, M. I. (1972). *Physics of Rare Earth Solids*. London: Ed. Chapman and Hall Ltd.
- Vinogradov, A. & Kaminskii, V. (2010). Efeito tensorresistivo e sensores das grandezas mecânicas com base em monossulfeto de samário. Em *Anais da 1ª CF-CPLP. O papel da física e das suas aplicações na educação e no desenvolvimento nos países de língua portuguesa*. Maputo, Moçambique: Ed. Univ. Eduardo Mondlane.

QUALIDADE DA ENERGIA ELÉCTRICA NO CAMPUS DA UNIVERSIDADE AGOSTINHO NETO

QUALITY OF ELECTRIC ENERGY AT AGOSTINHO NETO UNIVERSITY CAMPUS

Pascoal António Mussuco Napoleão¹

Suzanete Costa²

Anatoly Vinogradov³

RESUMO

A resolução do problema da segurança electroenergética tem a significação primacial para Angola. Ela inclui vários factores. A componente importante da segurança electroenergética representa a qualidade da energia eléctrica, o que é o problema actual em todo o mundo. As normas internacionais definem a qualidade da energia eléctrica como grau da correspondência das características da energia eléctrica em dado ponto do sistema eléctrico ao conjunto dos parâmetros padronizados. No trabalho foi realizado um complexo das medições dos índices da qualidade da energia eléctrica no campus da UAN. Nas medições utilizamos um medidor com diversas aplicações Fluke 41B. Foram medidos os índices da tensão e corrente da rede eléctrica e parâmetros energéticos, foram calculados índices de assimetria das fases, foi feita análise harmónica da tensão e da corrente no bloco administrativo e nos blocos dos prédios de ensino no campus da UAN na área de Camama de Luanda. Foram descobertos desvios sérios dos regimes da corrente em relação à norma internacional IEC 61000 - compatibilidade electromagnética, que se utiliza em Angola. Elas são distorções da sinusoidalidade, da assimetria de fases e da grande corrente no condutor neutro encontradas nos blocos do sistema eléctrico do campus. Tudo isso leva à agravação da segurança energética, às perdas e consumo da energia eléctrica significativos, ao aquecimento adicional, além de falhas antecipadas do equipamento eléctrico. São propostas as medidas de carácter técnico e de organização no sentido do melhoramento da qualidade da energia eléctrica nos objectos investigados.

Palavras-chave: Energia eléctrica, qualidade, medições, campus.

EXTENDED ABSTRACT

The solution to the problem of electro energetic security has for Angola a meaning of higher degree. This problem includes a number of factors. Among them, are power and the insufficient quantity of produced electric energy, the transport failures, the distribution of energy and rural use of electric power.

¹ Universidade Agostinho Neto, Luanda, Angola, pascoalnapol@gmail.com

² Universidade Agostinho Neto, Luanda, Angola, suzanete.costa@hotmail.com

³ Universidade Agostinho Neto, Luanda, Angola, vinluan@mail.ru

The important electro energetic security component represents the quality of electric energy in the supply systems of electric energy of companies, establishments, and cities.

Our analysis showed that, in Angola, in the majority of cases, they understand the quality of electric energy as the connection consistency and the absence of voltage interruptions. But these requirements only represent a small part of the problem. The supplied electric energy by a system has the quality when it guarantees the functioning of the electric equipment without experiencing alterations of significant performance. The IEC 61000 international norm – electro energetic compatibility which is used in the country, defines the quality of electric energy as the communication level of electric energy characteristics in a given point of the electric system to the set of the established indexes of electric energy quality standards. In practise, the quality control of indexes of electric energy is out of reach of rulers' sight, businesses and institutions respectively.

Taking into account the actual instrumental investigation of electric energy quality indexes, a complex of measurements was carried out at the Agostinho Neto University (ANU) campus. In this communication or report, the results obtained in the administrative block, geophysics and physics block, and in the mathematics A block are presented. For the parameters and the current and voltage investigations measurement, a universal measuring instrument “Fluke 41b” harmonic power measurer was used, which satisfies the international norms requirements. He put the supplying system nodes of the campus in circuitry at substations distribution transformers that form the circular bifilar circuit average voltage distribution of 15 kV.

For the main measured electric energy quality results refer to the values of electric parameters, the harmonic distortion indexes and the asymmetry of phases as well as energetic indexes. The analysis of the obtained results of the consumption regime and the quality of electric energy parameters in the campus objects showed the worst, which are the following: voltages imbalances in the mathematics A block – 2,7%; phase currents unbalances in the geophysics and physics blocks – 30,4% (15,5% - mathematics A block; 8,1% - administrative block); intensity of current in the neutral – in the administrative block, respectively, geophysics and physics block and mathematics A block – 60,4 A; 20,7 A e 18,6 A; power factor in a geophysics and physics block phase – 0,65; current's harmonic coefficients: geophysics and physics block – 32,6%, mathematics A block – 14,5%. The harmonic composition of phase currents in the investigated objects also were not always satisfactory. The third harmonic, for example, in a phase of the geophysics and physics block has a value of 13,3%, of the mathematics A block – from 16,6 to 24,3% and in the neutral conductor – 30,6%.

On ground of the results obtained from the analysis done on electric energy quality, we can make certain conclusions. General faults resulting from electric energy supply in Angola reveal in the supply of electric energy in the campus. In some months, planned and emergency interruptions do take place at a length of a day, and sometimes it can be extended for a week. Transition for the supply from the central electric reserve is not that effective due its insufficient power. Other conclusions are the following. There is disconnection from the public network. The frequency, the values, sinuosity and voltage symmetry in phases are stable and do not deviate from the international standards. A significant current imbalance is found in phase currents and big current is also found in the neutral conductor. In some blocks and phases there are harmonic distortions. In most of the phases the power factors are very high.

The causes for the observed phase disequilibrium and harmonic distortion in the university campus blocks are the bad distribution of charges in the electric energy network, the presence of significant monophasic charges, and non-linear charges, which are the electronic supply sources, discharge lamps, transformers in saturation regime, rectifiers, electronic variation devices, illumination systems, and semiconductor devices.

The negative effect of the electric energy quality defect in the campus' buildings lead to electric equipment functioning deterioration, (asynchrony motors, rectifiers, illumination); electric equipment life span reduction, lamps, transformers and others; problems in the operational protection by relays, earth connection, circuit breaker and fuses; bad functioning and operational faults in the electronic equipment (computers logic controllers, control systems, etc.); Joule's and eddy-current losses, increase in power consumption; effects over capacitors, neutral conductors, cables, transformers; errors in the electric energy consumption counter and measuring instrument; interference problems with communication systems.

Our recommendations to improve the quality of electric energy in the campus of Agostinho Neto University are as follow: It is necessary to upgrade the electro energetic security by increasing the autonomous central power supply (generators); take organization and technical characters measurements in the sense of charges redistribution in order to eliminate current imbalances on study buildings and others. And in some phases to implant compensator circuits for superior harmonic filtration and in other phases to composite or restore the reactive power.

Key-words: Electric power, quality, measurements, campus.

ENERGIA

PROBLEMA DA SEGURANÇA ELECTROENERGÉTICA EM ANGOLA

A solução do problema da segurança electroenergética tem para Angola um significado do mais alto grau. Esse problema inclui grande número de factores. Entre eles estão potência e quantidade de energia eléctrica produzida insuficientes, as falhas no transporte e distribuição da energia e electrificação rural. A componente importante da segurança electroenergética representa a qualidade da energia eléctrica nos sistemas de fornecimento de energia eléctrica das empresas, estabelecimentos, cidades.

Nossa análise mostrou que em Angola, na maioria dos casos, a qualidade da energia eléctrica é compreendida como a constância de ligação e a ausência das interrupções da tensão. Mas esses requerimentos representam só uma parte do problema. A energia eléctrica fornecida por um sistema tem qualidade quando garante o funcionamento do equipamento eléctrico sem que se verifiquem alterações do desempenho significativas. A norma internacional IEC 61000 - compatibilidade electromagnética, utilizada no país, determina a qualidade da energia eléctrica como o grau de correspondência das características da energia eléctrica num dado ponto do sistema eléctrico ao conjunto dos índices da qualidade da energia eléctrica estabelecidos pelas normas. Na prática, o controlo dos índices da qualidade da energia eléctrica está fora do alcance de vista dos dirigentes e serviços respectivos das empresas e instituições.

RESULTADOS DA INVESTIGAÇÃO

Levando em conta a actualidade da investigação instrumental dos índices da qualidade da energia eléctrica, foi realizado um complexo das medições no campus da Universidade Agostinho Neto (UAN). O método da investigação instrumental foi elaborado em correspondência com as normas internacionais (GOST-32144-2013, IEC 61000 - compatibilidade electromagnética). Nessa comunicação, apresentam-se os resultados para qualidade da energia eléctrica obtidos no bloco administrativo, bloco de geofísica e física e bloco de matemática A do campus. Para as medições dos parâmetros e a investigação das tensões e correntes eléctricas, foi usado um instrumento universal “medidor das harmónicas de potência Fluke 41b”, que satisfaz os requerimentos das normas internacionais. Ele punha em circuito os nodos do sistema de abastecimento de electricidade do campus (Silva, Vinogradov & Almeida, 2015) nos painéis das subestações transformadoras de distribuição, que formam o circuito bifilar circular de distribuição da tensão média de 15 kV mostrado na Figura 1.

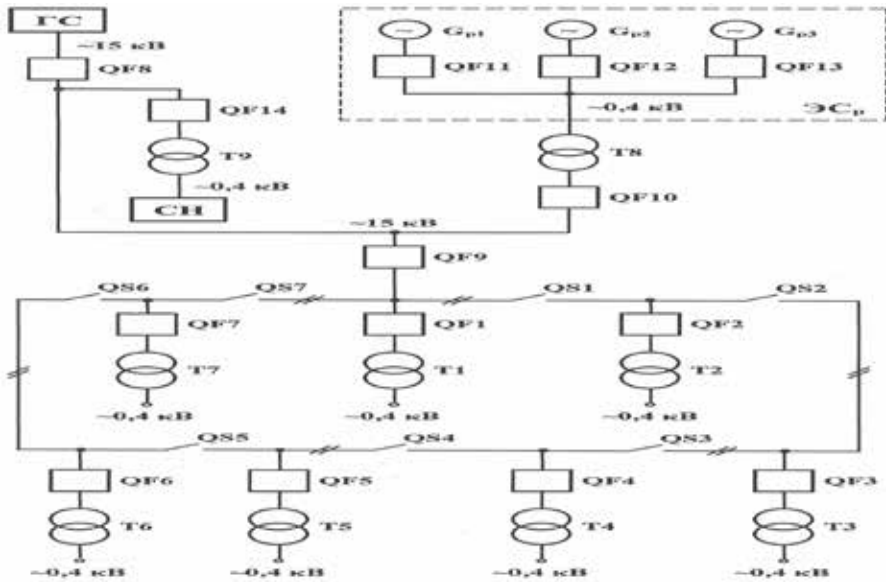


FIGURA 1. Sistema de fornecimento da energia eléctrica do campus da UAN.

Aos resultados principais da medição da qualidade da energia eléctrica referem-se os valores dos parâmetros eléctricos das tensões e correntes, os índices das distorções harmónicas e da assimetria de fases e também os índices energéticos. Eles são apresentados na Tabela 1. As designações dos coeficientes usadas são as seguintes: PF – factor de potência (inclui todas as harmónicas), DPF – factor de potência na harmónica principal; CF_u e CF_i – coeficientes de amplitude da tensão e da corrente; KF_i – coeficiente que caracteriza a relação das perdas adicionais nas harmónicas superiores às perdas na fundamental; K_u e K_i – coeficientes totais das harmónicas da tensão e da corrente (razão dos valores médios quadráticos da soma das harmónicas superiores e da fundamental),%; K_u^1 e K_i^1 – coeficientes totais das harmónicas da tensão e da corrente (razão dos valores médios quadráticos da soma das harmónicas superiores e todas as harmónicas, incluindo a primeira),%. Ao invés de graus de desequilíbrio inverso e homopolar, foi usado o método alternativo da avaliação do grau da assimetria das tensões e correntes. O coeficiente de desequilíbrio de tensão em fases representa

$$K_{u \text{ desequilíbrio}} = \frac{\Delta U_{\max}}{U_{\text{méd}}} * 100\%$$

onde $U_{\text{méd}}$ é o valor médio de três tensões de fases U_A , U_B , U_C ; ΔU_{\max} é o valor máximo da diferença entre tensão de fase e $U_{\text{méd}}$. Analogamente, determinou-se $K_{i \text{ desequilíbrio}}$.

TABELA 1. Resultados da medição dos regimes do consumo da energia eléctrica e dos índices da qualidade de energia eléctrica.

Parâmetro da rede eléctrica	Valor do parâmetro da rede eléctrica								
	Bloco administrativo			Bloco de geofísica e física			Bloco de matemática A		
	Fase			Fase			Fase		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
Tensão, V: - médio quadrático - soma das harmónicas superiores	226 3	226 3	227 3	226 2	226 2	227 2	221 2	227 2	215 3
Corrente, A: - médio quadrático - soma das harmónicas superiores - componente continua	296 4 -2	263 4 -2	262 4 -2	226 18 -8	138 16 -6	156 6 -8	50 12 6	40 12 -6	52 10 -4
Índices energéticos: - potência activa, kW - potência reactiva, kvar - potência total, kVA - factores de potência: $\frac{PF}{DPF}$	54 30 62 0,88	50 24 55 0,89	44 32 54 0,82	49,0 14 52,0 0,96	22,2 25 33,4 0,65	35,2 5 35,6 0,99	10,2 1,6 10,6 0,95	7 3,2 8,4 0,84	10,4 2,4 8,4 0,97
Coeficientes de distorção CF_u CF_i KF_i $K_u, \%$ $K_{u1}, \%$ $K_i, \%$ $K_{i1}, \%$	1,41 1,40 1,0 1,3 1,3 2,3 2,3	1,41 1,42 1,0 1,2 1,2 3,1 3,1	1,41 1,42 1,1 1,2 1,1 3,2 3,1	1,41 1,47 1,1 0,8 0,8 7,2 7,2	1,41 1,29 1,7 0,9 0,9 14,5 14,2	1,41 1,42 1,3 0,9 0,9 4,0 3,7	1,41 1,49 4,3 1 1 23,5 23,2	1,41 1,44 5 1 1 32,6 30,6	1,41 1,45 27 1,2 1,2 21,1 20,6
Corrente no condutor de neutro, A	60,4			20,7			18,6		
Coeficientes de desequilíbrio, % K_u deseq K_i deseq	0,13 8,1			0,57 30,4			2,7 15,5		

Os valores das harmónicas superiores das correntes no bloco administrativo (fases A, B e C), bloco de geofísica e física (fases A_1 , B_1 e C_1), bloco de matemática A (fases A_2 , B_2 , C_2 e fase neutra N_2) são apresentados nas Tabelas 2, 3.

ANÁLISE DOS RESULTADOS

A análise dos resultados obtidos das medições dos regimes de consumo eléctrico e dos parâmetros da qualidade da energia eléctrica nos objectos do campus mostrou que os piores são os seguintes: desequilíbrio de tensões no bloco de matemática A – 2,7%; desequilíbrio de correntes em fases no bloco de geofísica e física – 30,4% (15,5% – bloco de matemática A; 8,1% – bloco administrativo); intensidade de corrente no neutro – respectivamente no bloco administrativo, bloco de geofísica e física e bloco de matemática A – 60,4 A; 20,7 A e 18,6 A; factor de potência numa fase do bloco de geofísica e física – 0,65; coeficientes das harmónicas de corrente: bloco de geofísica e física – 32,6%, no bloco de matemática A – 14,5%. O composto harmónico das correntes das fases nos objectos investigados também não foi sempre satisfatório. Por exemplo, a terceira harmónica numa fase do bloco de geofísica e física tem o valor de 13,3%, do bloco de matemática A de 16,6 até 24,3% e no condutor de neutro, 30,6%.

TABELA 2. Valores das harmônicas superiores das correntes no bloco administrativo e bloco de geofísica e física.

F a s e	Valores das harmônicas superiores da corrente, %																	
	Números das harmônicas da corrente																	
	2	3	4	5	6	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	29	31
A	0,1	0,3	0	1,0	0	0,9	0,2	0,5	0,4	0	0	0,1	0,1	0	0,1	0	0	0
B	0,2	1,3	0,1	1,6	0,1	2,1	0,4	0,3	0,5	0,4	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,3	0,2	0,2
C	0,6	1,5	0,1	1,2	0,2	2,2	0,4	0,5	0,2	0,4	0,3	0,1	0,1	0,1	0,2	0,3	0,2	0,2
A ₁	3,3	6,2	0,4	0,3	0,4	1,0	0,5	0,6	0,2	0,8	0,3	0,5	0,8	0,5	0,1	0,2	0,4	0,3
B ₁	1,2	13,3	0,5	3,1	0,7	2,5	2,9	2,1	0,8	0,5	0,5	1,1	0,5	1,2	1,1	0,6	0,7	0,5
C ₁	2,2	0,4	0,3	1,9	0,6	1,3	0,6	0,4	0,8	0,8	0,3	0,7	0,2	0,6	0,7	0,2	0,5	0,3

TABELA 3. Valores das harmônicas superiores das correntes no bloco de matemática A.

F a s e	Valores das harmônicas superiores da corrente, %																	
	Números das harmônicas da corrente, %																	
	2	3	4	5	7	9	11	13	14	15	17	19	21	23	25	27	29	31
A ₂	4,7	18,1	3,8	8,2	4,1	4	3,2	3,6	2,6	2,4	2,3	2	1,6	2	2,6	1,3	1,5	1,1
B ₂	5,4	24,3	5	11,6	3,4	4,1	4,5	4,1	3,8	3,2	1,8	1,5	2,1	1,6	2,6	1,5	1,7	2,2
C ₂	5,5	16,6	5	4,6	4	3,9	3,6	2,6	2,4	2,3	2,1	1,6	2,6	1,4	2,1	1,1	1	1,1
N ₂		30,6		6,5	3,2	2,5		1,6		1,3			1,2	1	1			0,5

Com base na análise dos resultados das investigações da qualidade da energia eléctrica podemos obter certas conclusões. Falhas gerais próprias ao fornecimento da energia eléctrica em Angola revelam-se no fornecimento da energia eléctrica do campus. Em alguns meses têm lugar interrupções planeadas e de emergência com duração de dias até uma semana. A transição para fornecimento da central eléctrica de reserva não é bastante efectiva em vista da sua potência insuficiente. Outras conclusões são as seguintes: têm lugar desligamentos da rede pública; a frequência, os valores, a sinusoidalidade e a simetria de tensão em fases são estáveis e não têm desvios dos padrões internacionais; os regimes da corrente são não satisfatórios; encontra-se o significativo desequilíbrio das correntes em fases e grande corrente no condutor de neutro; em alguns blocos e fases há as distorções harmônicas; os factores de potência na maioria das fases são bastante altos.

As causas dos observados desequilíbrios em fases e distorção harmônica nos blocos do campus universitário são a má distribuição das cargas na rede de distribuição da energia eléctrica e a presença de significativas cargas monofásicas e cargas não lineares, que são as fontes de alimentação electrónicas, as lâmpadas de descarga, os transformadores em regime de saturação, os rectificadores, os variadores electrónicos, os sistemas de iluminação, os dispositivos semicondutores.

Os efeitos negativos dos defeitos em qualidade da energia eléctrica nos prédios do campus levam à deterioração do funcionamento do equipamento eléctrico (motores assíncronos, rectificadores, iluminação); redução da vida útil do equipamento eléctrico, lâmpadas, transformadores e outros; problemas na operação da protecção por relés, ligação à terra, disjuntores e fusíveis; mau funcionamento ou falhas de operação em equipamentos electrónicos (computadores, controladores lógicos, sistemas de controlo, etc.); perdas por efeitos de Joule e pelicular, aumento de consumo da energia; efeitos sobre condensadores, condutores de neutro, cabos, transformadores; erros nos contadores de energia eléctrica e instrumentos de medida; problemas de interferências com sistemas de comunicação.

As nossas recomendações para melhorar o estado da qualidade da energia eléctrica no campus da Universidade Agostinho Neto constituem o seguinte: é necessário elevar a segurança electroenergética por meio do aumento da potência da central autónoma (geradores); realizar as medidas de carácter de organização e técnico no sentido de redistribuição das cargas para liquidar o desequilíbrio das correntes nas fases dos prédios em estudo e outros; em algumas fases, implantar os circuitos compensadores para filtragem das harmónicas superiores e em algumas fases realizar a compensação da potência reactiva.

REFERÊNCIAS

GOST-32144-2013. (2014). *Energia eléctrica. Compatibilidade electromagnética dos meios técnicos*. Normas da qualidade da energia eléctrica nos sistemas de fornecimento de energia eléctrica de destino geral. Moscovo: Ed. Standartinform.

IEC. International Electrotechnical Commission. (2005). *IEC 61000*. Compatibilidade electromagnética (EMC).

Silva, J. F. S. G., Vinogradov, A. A. & Almeida, A. (2015). *Colectânea das comunicações da 4ª Conferência Científica-Prática Internacional "Fornecimento e uso da energia eléctrica efectivos e de qualidade"*. Ekaterinburg, Rússia: Ed. UMC UPI. (p. 35-37).

CÉLULAS SOLARES DE MULTIJUNÇÃO BASEADAS EM SILÍCIO CRISTALINO

MULTIJUNCTION SOLAR CELLS BASED ON CRISTALINE SILICON

José Almeida Silva¹
David Pera²

RESUMO

Nos últimos anos tem-se assistido a um forte crescimento da capacidade de produção de energia fotovoltaica (FV), tendo esta já ultrapassado os 500 GW (SolarPower Europe, 2018). Este crescimento da tecnologia FV tem-se baseado sobretudo nas tecnologias de silício cristalino, que têm tido grandes evoluções em termos de redução de custo e de aumento de rendimento. No entanto, as tecnologias de silício cristalino estão perto de alcançar o seu limite teórico de eficiência, sendo cada vez mais difícil melhorar o seu desempenho. Para continuar a aumentar o rendimento dos sistemas FV e favorecer o crescimento desta tecnologia, é necessário introduzir novos conceitos de célula solar. Um dos conceitos mais promissores em termos de melhoria do desempenho dos sistemas FV é a célula de multijunção. As células solares de multijunção são compostas por várias subcélulas de diferentes materiais, permitindo alcançar eficiências de conversão muito mais elevadas do que as convencionais com uma só junção. As células solares de multijunção baseadas em elementos do grupos III-V detêm já os recordes mundiais de eficiência, quer para uma iluminação de um sol, quer sob concentração; no entanto, o seu custo de produção é ainda demasiado elevado para que possam competir com as tecnologias altamente maduras de silício cristalino. Uma ideia cada vez popular na comunidade fotovoltaica é o desenvolvimento de células de multijunção baseadas em silício cristalino, procurando desta forma aliar o conceito de elevada eficiência das células de multijunção com a elevada maturidade das células de silício cristalino, obtendo-se células solares de elevada eficiência a um preço competitivo. Neste artigo pretende-se expor as virtudes deste percurso tecnológico e como analisar quais serão os melhores materiais para associar ao silício nas células de multijunção.

Palavras-chave: Energia fotovoltaica, Células solares de multijunção, Silício cristalino.

EXTENDED ABSTRACT

In the last decades the global photovoltaic (PV) production capacity has increased enormously, exceeding 500 GW of installed capacity and producing approximately 2% of the world's electricity (SolarPower Europe, 2018). The growth of the PV market is primarily based on crystalline silicon technologies, which currently account for more than 90% of the PV market (Fraunhofer ISE

¹ Instituto Dom Luiz (IDL), Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, jose.silva@fc.ul.pt

² Instituto Dom Luiz (IDL), Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, dmpera@fc.ul.pt

& PSE, 2018). Crystalline silicon devices have made immense progress in terms of conversion efficiency and production costs that boosted PV energy competitiveness. Still, crystalline silicon solar cells are very close to reaching their theoretical limit of efficiency, the so-called Shockley-Queisser limit, making it more and more difficult to improve their performance. The Shockley-Queisser limit is inherent to the photovoltaic effect, being all the solar cell materials subjected to it. Hence the only way to continue increasing the performance of PV systems and enable further growth of PV deployment is the introduction of new solar cell concepts.

Of all the alternative solar cell concepts such up- and down-conversion, hot carriers, etc. until today the most proven high-efficiency solar cell concept is the multijunction solar cell. Multijunction solar cells are made of sub-cells of different semiconductors with distinct band gaps, being each sub-cell specialized in the absorption of a certain region of the solar spectrum. Such configuration allows the achievement of much higher conversion efficiencies than conventional single-junction solar cells, as thermalization losses associated with high-energy photons are strongly reduced and the absorption of low energy photons is enhanced.

III-V groups' multi-junction solar cells already hold the efficiency world records for both one sun and concentrated illumination. However, the production costs of these solar cells are much higher than the ones of the crystalline silicon dominant technologies. This is mostly due to the methods employed in the production of these devices, as well as the vertical stacking structure used, which requires the existence of a lattice match between the different solar cell layers. Furthermore, the fact that the sub-cells are series-connected demands a current matching between all the sub-cells. Consequently, such devices are only used in niche markets such as space applications.

An idea that is becoming increasingly popular in the photovoltaic community is the development of crystalline silicon-based multijunction cells, this path seeks to combine the high-efficiency concept of multijunction cells, with the high maturity of crystalline silicon solar cell technologies, to obtain high-efficiency solar cells at a competitive price.

Over the years, various materials have been proposed for crystalline silicon partners in a multijunction cell. Several interesting results were obtained with III-V groups' semiconductors such as the gallium arsenide – GaAs (Gee & Virshup, 1988), or the aluminum gallium arsenide – AlGaAs (Umeno, Soga, Baskar, & Jimbo, 1998). More recently, multijunction cells were also produced by putting together crystalline silicon with cadmium zinc telluride – CdZnTe (Garland, Biegala, Carmody, Gilmore, & Sivananthan, 2011).

Using a three-terminal solar cell structure, where the different semiconductor sub-cells are connected in parallel, a bottom sub-cell of silicon/germanium – Si/Ge for absorption in the infrared range and a top sub-cell of

silicon carbide -SiC to absorb the ultraviolet radiation are proposed (Jimeno et al., 2016).

In recent years the rapid rise of perovskite cells has drawn the attention of the photovoltaic community, with several high-quality results being presented. Recently it has been produced a multijunction solar cell with a crystalline silicon sub-cell and perovskite solar cell, that for the first time achieved a higher efficiency than the best cell crystalline silicon solar cell, such structure reached an efficiency of 28% by the end of 2018 (Oxford PV, 2018).

Despite the impressive results obtained by perovskite cells, the reduced stability of these compounds still raises some doubts about the durability of cells made with these materials. The discussion on which materials to use in a crystalline silicon-based multijunction solar cell is still open (Connolly, Mencaraglia, Renard, & Bouchier, 2014; Yu, Leilaouioun, & Holman, 2016), and the silicon partners in a multijunction cell will certainly have to show stability over time, similar to that of crystalline silicon solar cells (i.e., about twenty-five years), as well as homogeneous efficiency over large areas. The employment of low cost and high yield production methods, as well as the use of abundant and non-toxic materials, will also be decisive factors for this choice.

Key-words: Photovoltaic energy, Multijunction solar cells, Crystalline silicon.

CONTEXTO

Nas últimas décadas tem-se assistido a um enorme aumento de potência solar fotovoltaica (FV) em todo o mundo. Em trinta anos a potência FV instalada aumentou três ordens de grandeza, tendo atingido os 510 GW, estimando-se que atualmente cerca da 2% das necessidades de eletricidade mundial sejam já asseguradas pela energia solar fotovoltaica (SolarPower Europe, 2018).

A acompanhar este aumento de potência instalada, tem-se verificado uma significativa redução do preço dos sistemas e, conseqüentemente, do preço da energia FV, que diminuiu vinte vezes nas últimas décadas, seguindo muito aproximadamente a lei de Swanson (Swanson, 2006), que prevê que por cada duplicação da potência fotovoltaica produzida o preço da energia FV se reduza 20%.

A energia FV deixou de ser vista como uma energia de nicho dependente de subvenções estatais, sendo cada vez mais encarada como uma forma de energia capaz de competir com as formas convencionais de produção de eletricidade (i.e., carvão, gás natural e nuclear), sendo cada vez mais numerosos os exemplos de mercados em que a energia FV é uma opção mais económica para produzir eletricidade do que as fontes convencionais.

O crescimento do mercado fotovoltaico tem-se baseado quase na sua totalidade nas tecnologias de silício cristalino nas suas formas mono e multicristalina, que no seu conjunto representam mais de 90% da potência FV instalada (Fraunhofer ISE & PSE, 2018). Apesar de nos últimos anos se ter verificado um aumento da eficiência dos módulos fotovoltaicos baseados em silício cristalino (Fraunhofer ISE & PSE, 2018), ao nível do laboratório a eficiência das células de silício tem estagnado, estando já muito próxima do seu máximo teórico determinado pelo limite de *Shockley-Queisser*.

LIMITE DE *SHOCKLEY-QUEISSER*

O processo de conversão de energia solar em energia elétrica que ocorre numa célula solar denomina-se efeito fotovoltaico. O efeito fotovoltaico consiste na absorção de um fóton de energia E_γ e na promoção de um eletrão da banda de valência (totalmente preenchida) para a banda de condução (BC). O **eletrão** que passa da banda de valência para ocupar um lugar na banda de condução deixa um **buraco** no mar de eletrões existente na banda de valência, pelo que se diz que ocorreu a criação de um par eletrão-buraco. O efeito fotovoltaico é por natureza um fenómeno quântico, isto é, um fóton incidente num material só é absorvido (dando lugar à criação do par eletrão-buraco) se a sua energia, E_γ , for igual ou superior à denominada energia de hiato, E_h , que corresponde à diferença entre a energia mínima da banda de condução e a energia máxima da banda de valência. Além disso, a energia aproveitada pela célula solar não pode exceder E_h por cada fóton absorvido, isto é, para os fótons com $E_\gamma > E_h$, o excedente de energia $E_\gamma - E_h$ perde-se por dissipação térmica (Figura 1).

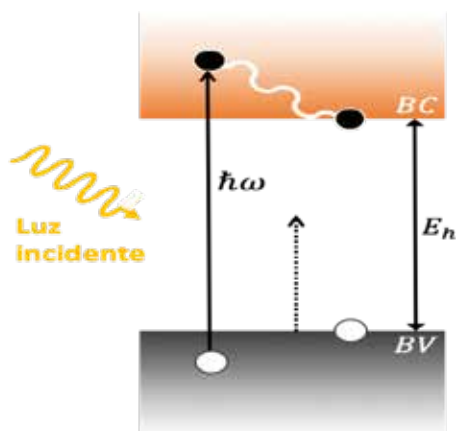


FIGURA 1. Efeito fotovoltaico.

Para uma célula de silício, assim como para uma qualquer célula solar de uma só junção, o conjunto das perdas devidas aos fótons não absorvidos ($E_\gamma < E_h$) e às perdas por termalização ($E_\gamma > E_h$) representam cerca de 60% da energia disponível do espectro solar e impõe às células de monojunção um limite máximo de eficiência. O limite teórico de eficiência para células de monojunção foi determinado por William Shockley e Hans Queisser com base em argumentos termodinâmicos considerando a troca radiativa entre o Sol, um corpo negro a uma temperatura de 6.000 K, e a célula solar um corpo a 300 K (Shockley & Queisser, 1961). Shockley e Queisser concluíram que o máximo de eficiência alcançável para uma célula solar depende da energia de hiato do semiconductor e atinge o seu máximo de 30% para uma célula solar com um hiato de 1.1 eV (Figura 2). Este máximo teórico de eficiência denomina-se de limite de *Shockley-Queisser*.

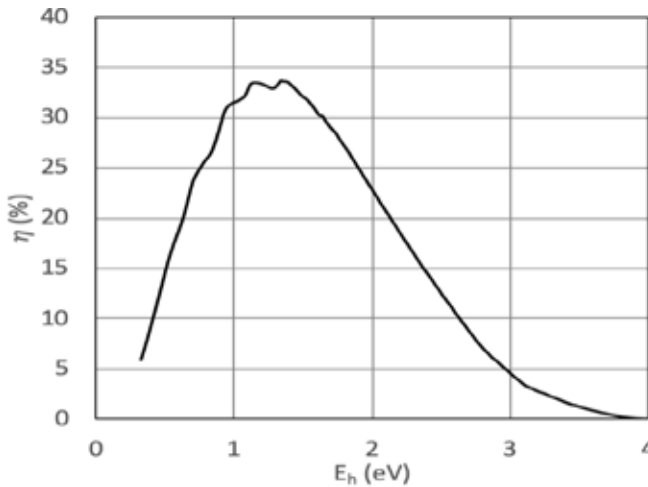


FIGURA 2. Limite de eficiência de células solares em função da sua energia de hiato (Shockley & Queisser, 1961).

Mais tarde, este estudo foi generalizado a uma célula solar submetida ao espectro de radiação AM1.5 (o espectro médio padrão à superfície terrestre), tendo-se obtido uma eficiência máxima para uma célula solar com um hiato de 1.15 eV de 33.2%, sendo este máximo de 32.7% para o silício cristalino, que tem uma energia de hiato de 1.12 eV.

Como foi referido, o crescimento do mercado fotovoltaico tem-se baseado quase exclusivamente no silício cristalino. Recentemente foi estabelecido um novo recorde mundial de 26.1% para as células de silício cristalino (Haase et al., 2018), aproximando este recorde ainda mais do seu limite teórico. À medida que a eficiência se aproxima do seu limite teórico, os pequenos aumentos de eficiência são cada vez mais difíceis e dispendiosos, pelo

que, para produzir dispositivos fotovoltaicos com eficiências de conversão superiores a 30%, será necessário utilizar conceitos de célula alternativos, que permitam ir além do limite de *Shockley-Queisser*.

PARA ALÉM DO LIMITE DE *SHOCKLEY-QUEISSER*

Há várias formas possíveis para superar este limite e uma delas é utilizar estruturas de célula que permitam captar fótons de baixa energia e convertê-los em fótons de energia superior. Este processo, denominado de **conversão ascendente**, consiste na utilização de uma célula solar com um nível de energia a meio do hiato (Figura 3a). Com a ajuda do nível de energia intermédio, a célula solar pode absorver dois fótons de baixa energia (i.e., com energia inferior ao hiato inicial), permitindo ao eletrão alcançar o nível de energia mais elevado, possibilitando assim o aproveitamento dos fótons de baixa energia que de outra forma não seriam absorvidos (Trupke, Green, & Würfel, 2002b). Outra estratégia possível de superar o limite de *Shockley-Queisser* é a utilização de estruturas de célula que permitam converter a energia de um fóton com uma energia muito superior à energia de hiato e convertê-lo em dois fótons que são absorvidos pela célula solar. Neste processo, denominado de **conversão descendente**, é utilizada uma estrutura com um nível de energia pelo menos duas vezes superior ao nível de energia da banda de condução da célula solar de que se pretende maximizar o rendimento. A promoção de um eletrão para este novo nível de energia requer a absorção de fótons com energia $E \geq 2E_h$ e o regresso deste eletrão ao estado de energia inicial permite a emissão de dois fótons de energia maior ou igual a E_h , que serão absorvidos pela célula solar, evitando assim as elevadas perdas por termalização associadas aos fótons de elevada energia e maximizando a eficiência de conversão energética (Trupke, Green, & Würfel, 2002a). Apesar de estes dois processos de conversão ascendente e de conversão descendente serem teoricamente possíveis, até hoje ainda não foram desenvolvidos dispositivos que os possam executar de forma eficiente.

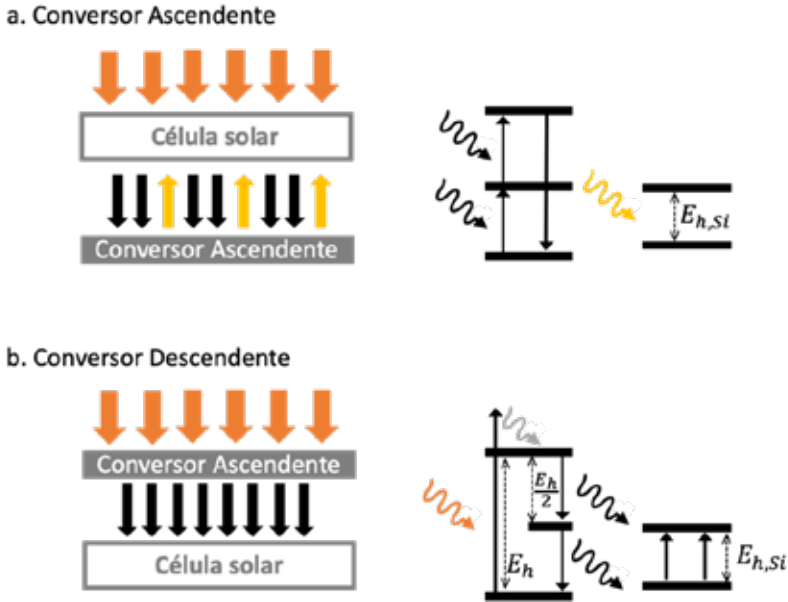


FIGURA 3. (a) Conversor ascendente; (b) Conversor descendente.

Outro conceito alternativo, ainda na fase de investigação e que poderá permitir a redução das perdas por termalização, é o conceito de portadores quentes ou *hot carriers* (König et al., 2010). A ideia neste caso é desenvolver células solares que consigam capturar os elétrons e buracos antes que estes percam o excesso de energia relativamente à energia de hiato (i.e., antes que ocorra a termalização), aumentando assim a eficiência de aproveitamento energético.

CÉLULAS SOLARES DE MULTIJUNÇÃO

De longe, o conceito de célula solar que até hoje teve mais sucesso na obtenção de eficiências de conversão acima do limite de *Shockley-Queisser* foi o conceito de células solares de multijunção ou *tandem*. O princípio de funcionamento das células de multijunção é que cada célula solar é constituída por várias subcélulas com diferentes energias de hiato cada uma especializada na absorção de diferentes partes do espectro solar. Na geometria de célula de multijunção mais comum, as subcélulas são empilhadas verticalmente, ordenadas pela sua energia de hiato, ficando as de maior energia de hiato no topo. Nesta configuração, as células estão ligadas em série.

A Figura 4 apresenta um exemplo deste tipo de célula *tandem* com três subcélulas com hiatos de energia E_{h1} , E_{h2} e E_{h3} , com $E_{h3} < E_{h2} < E_{h1}$. Assim,

a célula de topo absorve os fótons de maior energia, isto é, com $E_\gamma > E_{h1}$ sendo transparente para os fótons restantes. A subcélula seguinte absorve os fótons de energia $E_{h2} < E_\gamma < E_{h1}$ e a subcélula inferior absorve os fótons com $E_{h3} < E_\gamma < E_{h2}$.

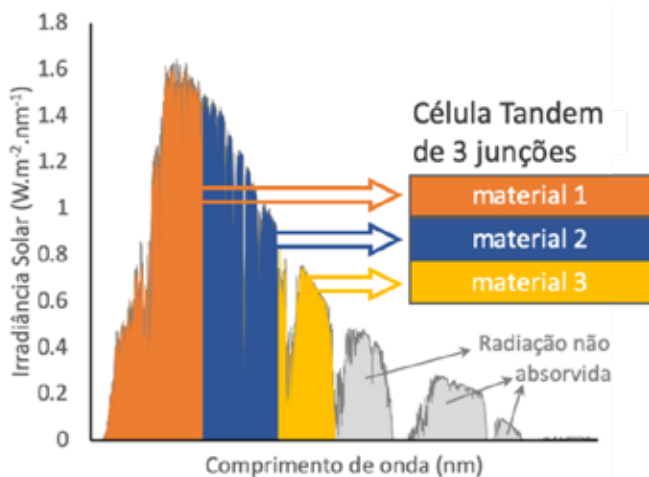


FIGURA 4. Exemplo de célula solar *tandem*.

Devido à forma seletiva como os fótons são absorvidos em cada subcélula, as células de multijunção conseguem obter um aproveitamento muito maior da energia solar. O limite teórico para a eficiência de uma célula de multijunção com um número infinito de junções é de 68% para uma radiação de um Sol e de 86% sob luz solar concentrada (De Vos, 1980). As células solares de multijunção detêm hoje todos os recordes de eficiência, tanto sob luz concentrada de 47.1% como para uma radiação de um Sol de 39.2%, ambos para uma célula de seis junções (NREL, 2019).

A grande maioria das melhores eficiências das células de multijunção foi obtida utilizando materiais dos grupos III (N, P, As, Sb, etc) e V (B, Al, Ga, In, etc.). No entanto, os custos de produção destes dispositivos continuam a ser demasiado elevados para que esta tecnologia possa competir com as tecnologias de silício cristalino dominantes. Isto deve-se sobretudo aos métodos utilizados na sua produção, bem como à estrutura de empilhamento vertical utilizada, que requer a existência de acordo de rede entre as diferentes subcélulas. Para além disso, o facto de as subcélulas estarem ligadas em série exige que todas as subcélulas tenham correntes iguais. Por esta razão, estas células solares são apenas utilizadas em alguns mercados de nicho, como é o caso das aplicações espaciais.

CÉLULAS SOLARES DE MULTIJUNÇÃO BASEADAS EM SILÍCIO CRISTALINO

Um conceito que tem tido cada vez mais apoio na comunidade fotovoltaica são as células de multijunção baseadas em silício cristalino. Pretende-se com este conceito, por um lado, aproveitar o potencial de alta eficiência das células solares de multijunção e, por outro lado, tirar proveito da elevada maturidade e competitividade das tecnologias de silício cristalino, procurando desta forma produzir células solares de muito alta eficiência com um baixo custo.

Ao longo dos anos, diversos materiais têm sido propostos para parceiros do silício cristalino numa célula de multijunção. Em particular, materiais semicondutores dos grupos II-VI e III-V com uma elevada energia de hiato têm sido vistos como uma boa escolha para absorver a radiação ultravioleta (Daud & Kachare, 1986). Alguns resultados promissores foram obtidos utilizando semicondutores III-V, como o arsenieto de gálio - GaAs (Gee & Virshup, 1988), ou o arsenieto de gálio alumínio - AlGaAs (Umeno et al., 1998). Mais recentemente foram também produzidas células de multijunção juntando à subcélula de silício uma subcélula de telureto de cádmio-zinco – CdZnTe (Garland et al., 2011).

A maior parte dos resultados referidos foi obtida utilizando estruturas de células de multijunção de dois terminais, em que as subcélulas estão ligadas em série, ou de quatro terminais, em que a corrente de cada subcélula é recolhida de forma independente. Utilizando uma arquitetura de célula de três terminais, em que as subcélulas com hiatos diferentes estão ligadas em paralelo (Figura 5), exigindo que todos os níveis da célula de multijunção tenham a mesma tensão de circuito-aberto (Jimeno et al., 2016), alteram-se as premissas da escolha do ou dos parceiros do silício na célula de multijunção. Para esta estrutura de célula é proposta uma subcélula inferior de silício/germânio - Si/Ge para absorção na gama do infravermelho e no topo uma subcélula de carboneto de silício - SiC para absorção da radiação ultravioleta.

Nos últimos anos, a rápida ascensão das células de perovskita tem polarizado as atenções da comunidade fotovoltaica, tendo sido apresentados diversos resultados de grande qualidade. Recentemente foi pela primeira vez produzida uma célula de multijunção com base numa célula de silício com uma eficiência superior à melhor célula de silício cristalino, tendo-se atingido o valor de 28% no final de 2018 (Oxford PV, 2018).

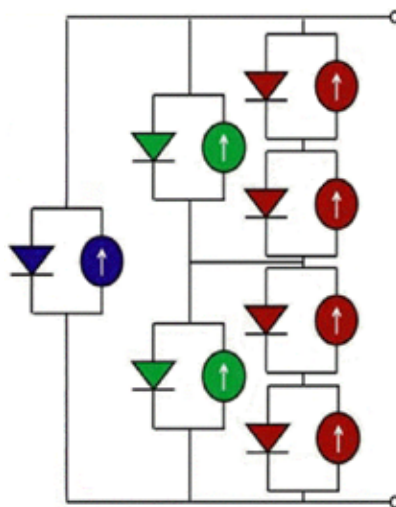


FIGURA 5. Célula de multijunção com ligação das subcélulas em paralelo. Cada nível é formado por um semiconductor diferente, a tensão de curto circuito deve ser igual para todos os níveis. Adaptado de Jimeno et al. (2016).

Apesar dos impressionantes resultados obtidos pelas células de perovskita, a reduzida estabilidade destes compostos ainda levanta algumas dúvidas sobre a durabilidade das células com estes materiais. A discussão sobre quais os melhores materiais a utilizar numa célula de multijunção de silício encontra-se ainda em aberto (Connolly et al., 2014; Yu et al., 2016), sendo certo que os parceiros do silício, numa célula de multijunção, terão que evidenciar uma estabilidade ao longo do tempo semelhante à do silício cristalino (i.e., cerca de vinte e cinco anos), assim como uma eficiência homogênea em grandes áreas. O recurso a métodos de produção de baixo custo e elevado rendimento, assim como a utilização de materiais abundantes e não tóxicos, serão também fatores decisivos para esta escolha.

REFERÊNCIAS

- Connolly, J. P., Mencaraglia, D., Renard, C., & Bouchier, D. (2014). Designing III-V multijunction solar cells on silicon. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*. <https://doi.org/10.1002/pip.2463>
- Daud, T., & Kachare, A. H. (1986). *High band gap II-VI and III-V tunneling junctions for silicon multijunction solar cells*. Google Patents.
- De Vos, A. (1980). Detailed balance limit of the efficiency of tandem solar cells. *Journal of Physics D: Applied Physics*. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/13/5/018>
- Fraunhofer ISE, & PSE. (2018). Photovoltaics Report 08/2018. *Fraunhofer ISE – PSE Projects*

- Garland, J. W., Biegala, T., Carmody, M., Gilmore, C., & Sivananthan, S. (2011). Next-generation multijunction solar cells: The promise of II-VI materials. *Journal of Applied Physics*. <https://doi.org/10.1063/1.3582902>
- Gee, J. M., & Virshup, G. F. (1988). 31%-efficient GaAs/silicon mechanically stacked, multijunction concentrator solar cell. In *Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference*.
- Haase, F., Hollemann, C., Schäfer, S., Merkle, A., Rienäcker, M., Krügener, J., Brendel, R., & Peibst, R. (2018). Laser contact openings for local poly-Si-metal contacts enabling 26.1%-efficient POLO-IBC solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2018.06.020>
- Jimeno, J. C., Gutierrez, R., Fano, V., Habib, A., Del Cañizo, C., Rasool, M. A., & Otaegi, A. (2016). A 3 Terminal Parallel Connected Silicon Tandem Solar Cell. *Energy Procedia*. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.07.031>
- König, D., Casalenuovo, K., Takeda, Y., Conibeer, G., Guillemoles, J. F., Patterson, R., Huang, L. M., & Green, M. A. (2010). Hot carrier solar cells: Principles, materials and design. *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*. <https://doi.org/10.1016/j.physe.2009.12.032>
- NREL. (2019). *Best Research-Cell Efficiency Chart*. Obtido 27 de Setembro de 2019, de <https://www.nrel.gov/pv/assets/pdfs/best-research-cell-efficiencies.20190923.pdf>
- Oxford PV. (2018). *Perovskite solar technology leader's solar cell sets new world record*. Obtido de <https://www.oxfordpv.com/news/oxford-pv-perovskite-solar-cell-achieves-28-efficiency>
- Shockley, W., & Queisser, H. J. (1961). Detailed balance limit of efficiency of p-n junction solar cells. *Journal of Applied Physics*. <https://doi.org/10.1063/1.1736034>
- SolarPower Europe. (2018). *Global Market Outlook For Solar Power 2018 - 2022*. *Global Market Outlook*. https://doi.org/10.1787/key_energy_stat-2014-en
- Swanson, R. M. (2006). A vision for crystalline silicon photovoltaics. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 14, 443-453. <https://doi.org/10.1002/pip.709>
- Trupke, T., Green, M. A., & Würfel, P. (2002a). Improving solar cell efficiencies by down-conversion of high-energy photons. *Journal of Applied Physics*. <https://doi.org/10.1063/1.1492021>
- Trupke, T., Green, M. A., & Würfel, P. (2002b). Improving solar cell efficiencies by up-conversion of sub-band-gap light. *Journal of Applied Physics*. <https://doi.org/10.1063/1.1505677>
- Umeno, M., Soga, T., Baskar, K., & Jimbo, T. (1998). Heteroepitaxial technologies on Si for high-efficiency solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. [https://doi.org/10.1016/S0927-0248\(96\)00149-3](https://doi.org/10.1016/S0927-0248(96)00149-3)
- Yu, Z., Leilaouioun, M., & Holman, Z. (2016). Selecting tandem partners for silicon solar cells. *Nature Energy*. <https://doi.org/10.1038/nenergy.2016.137>

ENERGIAS RENOVÁVEIS NOS PAÍSES AFRICANOS DE LÍNGUA PORTUGUESA: SITUAÇÃO ATUAL E PERSPETIVAS

RENEWABLE ENERGIES IN THE PORTUGUESE LANGUAGE AFRICAN COUNTRIES: CURRENT SITUATION AND OUTLOOK

José A. Silva¹
Marta Alegre²
Miguel C. Brito³
Isabel Abreu⁴

RESUMO

Em termos de recursos endógenos, os países africanos de língua oficial portuguesa têm um enorme potencial energético por explorar, potencial este que é diferente de país para país. A situação do sector energético nos países africanos de língua portuguesa é também ela bastante diversa, em particular no que diz respeito ao sector elétrico, variando entre países com baixas taxas de eletrificação, como a Guiné-Bissau, e países com o acesso quase universal à rede elétrica, como Cabo Verde. Apesar de cada país ter uma realidade muito particular, uma característica comum a todos eles é a existência de uma forte componente de biomassa tradicional. Nos últimos anos tem-se assistido a um grande aumento da implementação das energias renováveis, especialmente da energia solar fotovoltaica e eólica. Este crescimento tem sido acompanhado por uma forte redução dos custos dos equipamentos, que têm preços cada vez mais competitivos. Esta redução de custos abre novas oportunidades para investimentos do sector da energia renovável, em particular em países com economias emergentes. Neste artigo apresenta-se uma visão da situação atual do sector energético nos países africanos de língua portuguesa, analisando-se em particular o cenário de penetração de energias renováveis. Apresenta-se também um levantamento do potencial de energias renováveis existente nestes países e procura-se perspetivar o desenvolvimento futuro destas energias.

Palavras-chave: Energias renováveis, Eletrificação, África Lusófona.

EXTENDED ABSTRACT

Portuguese-speaking African countries have enormous untapped endogenous energy potential. The situation of the energy sector in these geog-

¹ Instituto Dom Luiz (IDL), Faculdade de Ciências Universidade de Lisboa, jose.silva@fc.ul.pt

² Associação Lusófona de Energias Renováveis, marta.alegre@aler-renovaveis.org

³ Instituto Dom Luiz (IDL), Faculdade de Ciências Universidade de Lisboa, mcbrito@fc.ul.pt

⁴ Associação Lusófona de Energias Renováveis, isabel.abreu@aler-renovaveis.org

raphies is quite diverse, ranging from countries with low electrification rates, such as Guinea-Bissau, to countries with almost universal access to the electricity grid, as Cape Verde.

Although each country has its specific reality, a feature common to all of them is the existence of a strong component of traditional biomass and a large abundance of renewable energy resources.

Another common feature to all the energy systems of the Portuguese-speaking African Countries is the combination of two main challenges: increasing demand, associated with the need for higher electrification rates as well as a growing population, and sustainable sources of energy, both from the economic and environmental perspectives.

In recent years there has been a large increase in the implementation of renewable energy projects, especially solar and wind energy. This growth has been accompanied by a sharp reduction in equipment costs with increasingly competitive prices, opening new opportunities for renewable energy investments, particularly in countries with emerging economies.

This paper presents an overview of the current situation of the energy sector in Portuguese-speaking African countries, analysing scenarios of renewable energy penetration. It also presents a survey of the renewable energy potential existing in these countries and seeks to envisage the future development of these energies.

The following tables summarise the electrification rate, installed and planned power capacity for each of the countries analysed.

TABLE 1. Electrification rate in 2017 (World Bank, 2019b).

Country	Electrification rate
Angola	30%
Cape Verde	93%
Guinea-Bissau	26%
Mozambique	27%
São Tomé e Príncipe	73%

TABLE 2. Installed capacity (MW). (-) stands for no power capacity or no data available

Country	Total	Grid-connected	Hydro	Solar	Wind
Angola	6100	6100	4100	-	-
Cape Verde	177	176	-	8	26
Guinea-Bissau	41	12	-	-	-
Mozambique	1100 ¹	1100	616	40	-
São Tomé e Príncipe	47	25	1.8	22	-

¹ Excluding the 1.9 GW produced in Cahora Bassa power dam that are directly delivered to South Africa.

TABLE 3. Renewable potential (MW). (-) stands for no power capacity or no data available

Country	Hydro	Solar	Wind	Biomass
Angola	18800	17000	600	1500
Cape Verde	-	2068	306	-
Guinea-Bissau	30	-	-	4.4
Mozambique	19000	23000	5000	2000
São Tomé e Príncipe	61	-	-	-

TABLE 4. Planned additional capacity (MW)

Country	Total ¹	Hydro	Solar	Wind	Biomass
Angola	3900	2200	220	200	500
Cape Verde ²	114/251	-	63/160	51/91	-
Guinea-Bissau	61	27	30	2	2
Mozambique	5800	3700	270	120	-
São Tomé e Príncipe	90	24	32	3.75	-

(-) stands for no power capacity or no data available; ¹ Including non-renewables; ² For 2025/2030, respectively.

These data reinforce the strategy of planned investment in renewable energy capacity to address the challenges of increasing demand with sustainable energy generation, highlighting the role of solar photovoltaics is expected to fulfil in the future energy mix of Portuguese-speaking African countries, due to its low cost, abundant resource, and ease of deployment. Wherever available, wind and hydropower can also be critical renewable resources to be tapped, together with increasing energy efficiency and reduction of power losses in regional grids.

Key-words: Renewable energies, Electrification, Portuguese-speaking Africa.

CONTEXTO

O panorama energético nos países africanos de língua oficial portuguesa (PALOP) é semelhante ao da região da África subsaariana em que se inserem. Em geral, estes países têm uma elevada percentagem da população sem acesso à eletricidade, situação agravada pelo rápido crescimento populacional. O perfil de consumo de energia nos PALOP é caracterizado por uma grande dependência da biomassa tradicional.

Em termos de produção de eletricidade, o grande desafio que se coloca aos países da África lusófona é o de conseguir suprir as necessidades crescentes de consumo de uma forma financeira e ecologicamente sustentável,

garantindo um acesso seguro e fiável à eletricidade para a generalidade da população. A existência de importantes recursos renováveis, associada à grande redução dos preços das tecnologias de produção de energia renovável emergentes, faz destas formas de energia uma das melhores respostas aos desafios energéticos que estes países enfrentam. Para além disso, a aposta em energias como a solar fotovoltaica ou a eólica é particularmente adequada para promover a eletrificação em zonas sem acesso à rede elétrica.

Neste artigo, vamos analisar o contexto específico de cada um dos países da África lusófona, Angola, Cabo Verde, Guiné-Bissau, Moçambique, São Tomé e Príncipe⁵ em termos de eletrificação e utilização das energias renováveis, procurando descrever a realidade atual e perspetivar desenvolvimentos futuros.

O PRESENTE E FUTURO DA PRODUÇÃO DE ENERGIA

ANGOLA

Em 2017 Angola tinha uma potência instalada de 6 GW e uma taxa de eletrificação de 30% (World Bank, 2019b), com uma produção baseada em centrais hidroelétricas (68%) e centrais térmicas. O desafio que se põe ao desenvolvimento da rede elétrica de Angola é semelhante ao de muitos países africanos. Por um lado, é necessário um grande esforço para efetuar o alargamento da rede elétrica de modo a garantir o acesso à eletricidade à generalidade da população. Por outro lado, é necessário fazer face aos desafios que o aumento da população e o aumento do consumo de energia *per capita* colocam ao sistema electroprodutor. Finalmente, os investimentos em novas centrais de produção de eletricidade devem ter em conta critérios de sustentabilidade tanto económica como ambiental, sendo por isso essencial a maximização do aproveitamento dos recursos endógenos, particularmente aqueles que permitem produzir eletricidade por meio de fontes de energia renováveis. A avaliação do potencial de recursos energéticos efetuada em Angola, além de ter permitido quantificar os excecionais recursos da grande hídrica, cujo potencial ascende a 18.2 GW, permitiu identificar um potencial fotovoltaico (FV) de 17.3 GW, 1.5 GW de recursos de biomassa, 0.6 GW de potencial eólico e igual potencial mini-hídrico (Minea, 2016).

O plano de desenvolvimento do sistema elétrico de Angola prevê até 2025 o aumento da taxa de eletrificação para 60% e o crescimento da capacidade de produção instalada para 10 GW. Este crescimento será, sobretudo, feito por meio do aumento da capacidade de produção hidroelétrica (+2.2 GW)

⁵ Neste trabalho não foi analisada a situação específica da Guiné Equatorial.

e da aposta em centrais termoeletricas (+1.2 GW) a gás natural, substituindo em parte a utilização de combustíveis mais caros e mais poluentes, como o fuelóleo. Será também feita uma aposta crescente nas energias eólica e solar fotovoltaica, com a previsão de instalação até 2025 de cerca de 220 MW destas formas de energia (Minea, 2016).

Para aumentar a taxa eletrificação, será feita uma grande aposta na eletrificação rural com a criação de mini-redes autónomas. Estas redes serão alimentadas por fontes de energias renováveis e neste âmbito merece destaque o projeto “aldeias solares”, que prevê a instalação de sistemas fotovoltaicos com um total de 10 MW em 500 aldeias e que já se encontra na terceira fase (Minea, 2016). Haverá também um programa de substituição de geradores a diesel por painéis fotovoltaicos que prevê a instalação de 10 MW em sistemas isolados. Prevê também a instalação de 100 MW de painéis fotovoltaicos ligados à rede e a criação de uma fábrica de painéis fotovoltaicos.

Para além do aumento da produção de grandes centrais hídricas, serão também adjudicadas diversas centrais mini-hídricas, num total de 100 MW, 42 MW em projetos ligados à rede e 58 MW em 11 mini-redes isoladas.

Até 2025 está planeada a instalação de 100 MW em três parques eólicos, 20 MW em Tombwa, 40 MW no Kwanza Norte e 40 MW em Huíla. Está ainda prevista uma forte aposta na geração elétrica a partir de biomassa, com um total de 500 MW (Minea, 2016). A médio prazo, o desenvolvimento do sistema elétrico angolano passará muito por um maior aproveitamento dos recursos renováveis, em particular do solar fotovoltaico, devido à sua grande abundância e distribuição por todo o território.

CABO VERDE

Com uma potência elétrica instalada de 177 MW, Cabo Verde é entre os PALOPs aquele que tem a taxa de eletrificação mais elevada, tendo atingido 93% em 2017 (World Bank, 2019b). A energia eólica representava uma potência 26 MW e a energia fotovoltaica 8 MW, contribuindo estas duas formas de energia com cerca de 20% da potência instalada. A restante produção de eletricidade baseia-se na utilização de combustíveis fósseis, que, além do seu impacto ambiental, constitui um enorme peso económico para um país que, não possuindo estes recursos, depende da sua importação. Não é pois surpreendente que o plano energético de Cabo Verde para as próximas décadas ponha uma grande ênfase no aumento da produção de eletricidade por meio de fontes renováveis, reduzindo progressivamente a utilização de energias fósseis até atingir 100% de produção de energia renovável em 2030 (Governo de Cabo Verde, 2018).

A avaliação dos recursos renováveis permitiu identificar como principais recursos renováveis o solar fotovoltaico, com 2.068 MW, e o eólico, com

306 MW, sendo ainda de assinalar um potencial relevante de bombagem hídrica para acumulação de energia e de energia das ondas (Gesto Energia, 2011).

As principais metas da estratégia de Cabo Verde para o desenvolvimento do sector energético nas próximas décadas são o aumento da potência instalada para fazer face ao crescimento da procura, além do aumento da sustentabilidade económica e ambiental do sistema elétrico. Para as alcançar será feita uma forte aposta nas fontes de energia renovável, de modo a atingir 114 MW de potência renovável em 2025 (63 MW de FV e 51 MW de eólica) e 251 MW em 2030 (160 MW de FV e 91 MW de eólica), altura em que a produção baseada em fontes renováveis deverá representar 50% do consumo de eletricidade. Para fazer face à variabilidade das fontes de energia renovável, será também feita uma importante aposta em sistemas de acumulação de energia, quer de bombagem hidroelétrica, quer com a utilização de baterias elétricas ligadas à rede (Governo de Cabo Verde, 2018). Outro vetor essencial da estratégia energética de Cabo Verde é a aposta no aumento da eficiência energética de edifícios e equipamentos, de modo a reduzir até 2030 as necessidades energéticas em 10% relativamente ao cenário de base. Será também feito um forte investimento na redução das perdas na rede elétrica, que atualmente representam de 23% da eletricidade produzida.

Dentro dos investimentos em energia fotovoltaica em curso merecem destaque a minicentral na ilha do Sal, com 1.3 kW que se junta aos 2.2 MW da central já existente nessa ilha, o concurso para a central da ilha da Boavista (5 MW), prevendo-se ainda a instalação até 2030 de 160 MW em sistemas isolados da rede elétrica.

Os principais investimentos em energia eólica incluem a construção de um parque de 10 MW na ilha de Santiago, a construção de duas mini-redes híbridas, com um total de 14.5 kW, prevendo-se ainda a instalação até 2030 de 91 MW de produção eólica com suporte de bombagem hidroelétrica.

Em termos de energia hídrica, merece destaque o estudo de viabilidade para a construção de uma central hidroelétrica e a construção de uma central de energia das ondas destinada à dessalinização de água (AfDB, 2016).

GUINÉ-BISSAU

Apesar de taxa de eletrificação ter aumentado de forma consistente na última década, a Guiné-Bissau é ainda um dos países com mais baixo acesso à eletricidade da África subsaariana, com 26%, existindo perto de 1.7 milhão de pessoas sem acesso à eletricidade (World Bank, 2019b). Para além disso, este acesso é bastante assimétrico, sendo de cerca de 30% na capital Bissau e inferior a 1% nas zonais rurais, sendo o sul do país e ilhas particularmente desfavorecidos. O acesso à rede elétrica nacional verifica-se sobretudo no sector

autónomo de Bissau, sendo que a restante população com acesso à eletricidade tem-no por meio de sistemas autónomos (ALER, 2018).

Para além do enorme aumento da procura de eletricidade, o principal desafio que se coloca à Guiné-Bissau é a generalização do seu acesso. O plano de investimento para a energia da Guiné-Bissau estabelece para 2030 a meta de 80% de taxa de eletrificação, prevendo um ambicioso programa de eletrificação rural (Governo da Guiné-Bissau, 2017), que está, no entanto, atrasado (ALER, 2018).

O consumo de energia da Guiné-Bissau é baseado no uso de biomassa tradicional, sendo a produção de eletricidade essencialmente de origem térmica, produzida por geradores a diesel em Bissau e outros centros urbanos. A contribuição das energias renováveis é ainda diminuta, existindo apenas alguns projetos no interior do país (ALER, 2018). O facto de não existir um atlas atualizado dos recursos renováveis do país dificulta a estimativa do potencial existente. Sabe-se, no entanto, que o potencial solar fotovoltaico varia entre 1.500 a 1.800 kWh/(kWp·ano)⁶, com o maior potencial localizado nas ilhas (GSA, 2019). O potencial hídrico localiza-se sobretudo no este do país (rios Corubal e Geba), com um potencial estimado de cerca de 30 MW de pequenas centrais hídricas. Tendo uma economia baseada na agricultura, sobretudo de caju, arroz e cana-de-açúcar, o potencial de aproveitamento de biomassa é significativo, sendo o potencial imediato estimado em 4.4 MW (ALER, 2018).

Depois da instalação em 2014 da central de Bambadinca (Arsénio et al., 2014), uma central de 312 kW híbrida fotovoltaico/diesel que fornece eletricidade a 7.000 habitantes, sucederam-se outros projetos semelhantes, como a central de Contuboel (100 kW) e a de Bissorã (500 kW), para além de outros de menor escala em escolas, hospitais, sistemas de bombagem, irrigação e iluminação pública (ALER, 2018).

Está ainda em curso um programa de instalação de pequenos sistemas fotovoltaicos e foi iniciada a construção da central de Gardete de 20 MW. Decorrem ainda estudos de viabilidade para três centrais fotovoltaicas, com acumulação de energia de 20-30 MW.

Os principais projetos de aproveitamento de energia hídrica previstos no plano nacional para as energias renováveis são as centrais de Saltinho e Cussilinta, com uma capacidade total de 27 MW (Governo da Guiné-Bissau, 2017). Está ainda planeado um aproveitamento do potencial de biomassa no valor de 2 MW e um igual valor de aproveitamento do potencial eólico (ALER, 2018).

⁶ Uma instalação fotovoltaica de 1 kW de potência situada num local com um potencial de 1.000 kWh/(kWp·ano) produz durante um ano 1.000 kWh de energia.

MOÇAMBIQUE

Ainda que o consumo de eletricidade *per capita* de Moçambique esteja acima da média da região em que se insere, em 2017 a sua taxa de eletrificação de 27% era das mais baixas do continente (World Bank, 2019b).

Apesar de possuir uma produção hidroelétrica muito elevada, devido à central hidroelétrica de Cahora Bassa, cerca de dois terços da energia produzida nesta central são exportados, não contribuindo para o fornecimento de energia de Moçambique. Ainda assim, em 2015, 57% do consumo de eletricidade de Moçambique era assegurado por energia hidroelétrica, sendo o restante garantido por centrais térmicas (39%) e solar fotovoltaico (4%). A biomassa tradicional continua a ser a forma de energia primária mais utilizada em Moçambique, sobretudo para uso doméstico (ALER, 2017).

O desenvolvimento do sistema elétrico de Moçambique nas próximas décadas terá, por um lado, que assegurar a generalização do acesso à eletricidade a todo o território e, por outro lado, fazer face ao grande aumento da população, que será superior a 65 milhões em 2050 (World Bank, 2019a). Para dar resposta a este grande aumento da procura, prevê-se um acréscimo da potência instalada de cerca de 5.8 GW.

Moçambique não possui uma rede de eletricidade única e fechada; uma das principais dificuldades ao desenvolvimento e à manutenção da rede é a grande distância existente entre as fontes de produção e de consumo. A condição física da rede elétrica não é a melhor, comprometendo nalguns casos a segurança do abastecimento e a qualidade do serviço. Para os próximos anos está prevista a construção de novas ligações nacionais e interligações regionais, não só para mitigar o problema da degradação da sistema elétrico, mas também para potenciar novos projetos de geração.

A avaliação dos recursos de energia endógenos de Moçambique identificou como principais recursos a energia solar, com um potencial de mais de 23.000 GW, a energia hídrica, com 19 GW, a energia eólica, com 5 GW, e a biomassa, com 2 GW.

Tendo em conta esta avaliação e as previsões de crescimento da procura energética, foi definido o plano diretor para o desenvolvimento do sistema elétrico de Moçambique, que prevê até 2030 um forte aumento da potência de geração da grande hídrica (+3.7 GW) e da produção em centrais térmicas (+2.8 GW), para além do investimento significativo em pequena hídrica, solar fotovoltaico e energia eólica.

Para além do investimento feito na grande hídrica, com a construção dos aproveitamentos de Cahora Bassa Norte (1.245 MW), Mphanda Nkuwa (1.500 MW), Lupata (600 MW) e a primeira fase de Tete (300 MW), estão ainda construção ou em fase de estudo diversas centrais mini-hídricas, que até 2030 deverão contribuir com 50 MW adicionais (EDM, 2018). No período

2030-2040, está prevista a extensão da potência de Tete para 900 MW e a adição de 950 MW de potência mini-hídrica.

Está prevista a instalação de 180 MW de energia fotovoltaica até 2030 e 270 MW no período 2030-2040. Relativamente a esta energia, merece ainda destaque o facto de Moçambique ter também uma fábrica de painéis fotovoltaicos.

Até 2040 está prevista a instalação de uma potência de 120 MW de energia eólica, dos quais 30 MW deverão estar concluídos até 2030.

Uma das estratégias a utilizar para a expansão do acesso aos serviços energéticos a todo o território moçambicano é a criação de mini-redes (~ 500 kW) e micro-redes elétricas (50 kW) autónomas baseadas em sistemas de geração de energia renovável (mini-hídrica, fotovoltaica, eólica).

SÃO TOMÉ E PRÍNCIPE

Nos últimos anos, a taxa de eletrificação de São Tomé e Príncipe (STP) tem aumentado de uma forma muito consistente, tendo já alcançado os 72.5% em 2017 (World Bank, 2019b). Neste período, o consumo de eletricidade quadruplicou, tendo em 2016 ultrapassado os 100 GWh. Dado que nas últimas décadas não houve instalação significativa de energias renováveis, este aumento de consumo tem sido essencialmente suportado por um incremento da produção das centrais térmicas. Atualmente mais de 90% da eletricidade fornecida à rede elétrica de STP é produzida em centrais térmicas alimentadas por combustíveis fósseis, sendo a restante produzida na central hidroelétrica do Contador. Esta dependência da produção de eletricidade na utilização de combustíveis fósseis constitui um desafio para a economia do país. Outro problema do sistema elétrico de STP que terá de ser enfrentado nos próximos anos é o das elevadas perdas de eletricidade, estimadas em cerca de 40% da produção.

De forma a reduzir as emissões de gases de efeito estufa e também a reduzir o peso das importações de combustíveis fósseis na economia de STP, a aposta nas energias renováveis é prioritária. No entanto, a inexistência de um atlas atualizado dos recursos renováveis é um obstáculo a uma exploração eficiente destes recursos.

O potencial de aproveitamento da energia fotovoltaica em STP varia entre 1.000 e 1.500 kWh/kW (GSA, 2019). Apesar deste recurso ser diferente na ilha de São Tomé e na ilha do Príncipe e variar ao longo das ilhas, está disponível um pouco por todo o território. Em termos de projetos fotovoltaicos, há a registar a implementação de uma central fotovoltaica de 5 MW, a concretização do projeto de comunidades rurais, que resultou na instalação e entrega de sistemas fotovoltaicos de 500 W a 24 cooperativas, e a instalação de 500 luminárias solares em ruas de STP, além das instalações de 41 kW do edifício

das Nações Unidas, de 30 kW do Hotel Ecológico da Praia do Inhame e de 9.6 kW da Rádio Comunitária de Porto Alegre. Há também diversos projetos de instalação fotovoltaica em estudo a aguardar financiamento, dos quais se destacam projetos de instalação de centrais de 5 a 12 MW (ALER, 2020).

Um estudo em 1981 identificou uma capacidade total de potencial hídrico de 61 MW e uma produção anual estimada em 244 GWh nas doze bacias hidrográficas existentes, nove em São Tomé e três na ilha do Príncipe. Está também em curso um projeto de reabilitação da central hidroelétrica do Contador, que permitirá aumentar a sua capacidade em cerca de 2 MW. Estão também em fase de implementação três projetos de pequenas centrais hídricas, com um total de 18 MW (ALER, 2020).

Apesar da escassez de dados existente sobre o recurso eólico em STP, um estudo encomendado pela região autónoma do Príncipe (RAP) concluiu que o recurso eólico no Príncipe é limitado, pois os locais com melhores recursos situam-se em áreas pouco acessíveis e protegidas. Foi estabelecida uma meta de instalação de 3.75 MW de potência eólica, destacando-se o projeto de central de energia eólica para alimentação de torres da Companhia São Tomense de Telecomunicações na RAP (ALER, 2020).

Existe ainda algum potencial de aproveitamento de resíduos agrícolas e florestais, oleaginosas não comestíveis para valorização por meio de digestores anaeróbicos na produção de biogás de utilização doméstica (cozinha) e para a geração de eletricidade, merecendo destaque o projeto “Bioenergia em São Tomé e Príncipe – Aproveitamento Energético de Biogás”.

CONCLUSÕES

Os grandes desafios energéticos que se colocam aos países africanos de língua portuguesa são, por um lado, as crescentes necessidades energéticas das suas populações e, por outro, a necessidade de encontrar formas de produção de eletricidade ecológica e economicamente sustentáveis. As energias renováveis são instrumentos essenciais para a necessária transformação dos sistemas elétricos destes países. Dado o preço atual dos sistemas fotovoltaicos, a universalidade do recurso solar e a particular adequação desta tecnologia a instalações remotas, a energia fotovoltaica terá uma importância crucial nesta transformação. Será também fundamental utilizar eficientemente os recursos hídrico e eólico, sempre que disponíveis.

REFERÊNCIAS

- AfDB. (2016). *Cape Verde wins SEFA grant to develop revolutionary wave-powered desalination system*. Obtido em 2 de janeiro de 2020 de <https://www.afdb.org/en/news-and-events/blue-economy-cape-verde-wins-sefa-grant-to-develop-revolutionary-wave-powered-desalination-system-15296>
- ALER. (2017). *Energias renováveis em Moçambique - Relatório Nacional do Ponto de Situação*. Obtido de http://www.aler-renovaveis.org/contents/activitiesdocuments/aler_mz-report_oct2017_web.pdf
- ALER. (2018). *Energias renováveis e eficiência energética na Guiné-Bissau - Relatório nacional de ponto de situação*. Obtido de http://www.aler-renovaveis.org/contents/activitiesdocuments/aler_relatorio_gb_2018.pdf
- ALER. (2020). *Relatório nacional do ponto de situação das energias renováveis e eficiência energética em São Tomé e Príncipe*. No prelo.
- Arsénio, J., Afonso, D., Dourado, S., Alves, J. M., & Brito, M. C. (2014). 312 kW Solar PV-Diesel Minigrid in Bambadinca, Guinea-Bissau. In *1st Africa Photovoltaic Solar Energy Conference*.
- EDM. (2018). *Integrated master plan Mozambique power system development*.
- Gesto Energia. (2011). *Atlas e projecto de energias renováveis de Cabo Verde*. Obtido de <http://gestoenergy.com/wp-content/uploads/2019/02/Atlas-e-Projectos-de-Energias-Renováveis-de-Cabo-Verde.pdf>
- Governo da Guiné-Bissau. (2017). *Plano de investimento para a energia sustentável da Guiné-Bissau: período 2015-2030*. Obtido de http://www.ecreee.org/sites/default/files/documents/news/web_plano_de_investimento_optimized.pdf
- Governo de Cabo Verde. (2018). *Plano Estratégico de Desenvolvimento Sustentável de Cabo Verde*. Obtido de [https://peds.gov.cv/sites/default/files/2018-10/PEDS 2017-2021 - Versão Final.pdf](https://peds.gov.cv/sites/default/files/2018-10/PEDS%202017-2021%20-%20Versão%20Final.pdf)
- GSA. (2019). *Global Solar Atlas*.
- Minea, R. de A. (2016). *Angola Energia 2025: visão de longo prazo para o sector eléctrico*. Ministério da Energia e Águas da República de Angola. Obtido de www.angolaenergia2025.com
- Word Bank. (2019a). *Population Dynamics by Country and Groups*. Obtido de <http://datatopics.worldbank.org/health/population>
- World Bank. (2019b). *Access to electricity (% of population)*. Obtido em 2 de janeiro de 2019, de <https://data.worldbank.org/indicator/EG.ELC.ACCS.ZS>

MEDINDO A POBREZA ENERGÉTICA EM MOÇAMBIQUE

MEASURING ENERGY POVERTY IN MOZAMBIQUE

Mendita Arnaldo Ugembe¹
Miguel C. Brito²
Roula Inglesi-Lotz³

RESUMO

Embora os serviços modernos de energia sejam tomados como garantidos nos países desenvolvidos, eles permanecem escassos para a maior parte da população dos países em desenvolvimento. Moçambique tem grande potencial em recursos energéticos renováveis e não renováveis (é um dos maiores produtores de energia na Comunidade de Desenvolvimento da África Austral). Nos últimos anos, esforços têm sido empreendidos para aumentar o acesso à eletricidade no país; contudo, 75% da população moçambicana vivendo em zonas urbanas e rurais continua sem acesso à eletricidade. Assim, este trabalho tem por objetivo avaliar a extensão da pobreza energética em Moçambique, calculando o Índice Multidimensional de Pobreza Energética no país e, em nível provincial, usando dados do inquérito demográfico e de saúde para as famílias moçambicanas. O estudo concluiu que Moçambique melhorou da pobreza energética aguda (MEPI > 0,9) em 2009 para pobreza energética moderada (MEPI = 0,65) em 2015. Contudo, esta melhoria foi acompanhada por maiores desigualdades. Adicionalmente, foi demonstrado que a pobreza energética no país é um problema de falta de acesso físico à energia e também falta de capacidade de pagamento pelos serviços modernos de energia capazes de satisfazer as necessidades básicas das pessoas. Zambézia é a província mais energeticamente pobre, seguida de Nampula e Cabo Delgado. Finalmente, são propostas mudanças no método por forma a tomar em consideração a importância dos usos produtivos de energia para o desenvolvimento humano.

Palavras-chave: Pobreza energética, Redução da pobreza, Desenvolvimento.

EXTENDED ABSTRACT

Although modern energy services are taken for granted in industrialized countries, they remain unavailable to a range of the world population in developing countries. Mozambique has significant potential for renewable and non-renewable energy resources (it is one of the largest energy producers

¹ Faculdade de Gestão de Recursos Florestais e Faunísticos – UCM e estudante da Faculdade de Ciências – Universidade de Lisboa. maugembe@fc.ul.pt

² Faculdade de Ciências - Universidade de Lisboa. mcbrito@fc.ul.pt

³ Faculty of Economic and Management Sciences- University Of Pretoria. roula.inglesi-lotz@up.ac.za

in the Southern African Development Community). Substantial efforts have been undertaken in recent years to increase electricity access in the country, however, almost 75% of the Mozambican population in rural and urban areas still lives without access to electricity and electricity reliability and affordability (for access and utilization) remain challenging issues for the country's electricity sector. The objective of this work is to assess the extent of energy poverty in Mozambique by calculating the multidimensional energy poverty index and the impact of the different dimensions of energy poverty in the country and at the provincial level, using Mozambican demographic and health surveys data for households.

Although knowing energy poverty level measured by MEPI is an important issue in its own right, it does not give detailed information on its components, therefore, focusing also on the different dimensions of energy poverty in the country, this study provide detailed and accurate information that could help identify the magnitude and intensity of energy poverty in the country which could help policymakers to design targeted policies, regulatory and financial strategies to reduce poverty in the country, to monitor the progress and effectiveness of implemented policies in order to improve the ways of acting in the fight against poverty. Furthermore, the measure will bring to light the real situation of the country in the different dimensions and regions which may raise concerns about the issue

The study concludes that the country has improved from acute energy poverty ($MEPI > 0.9$) in 2009 to moderate energy poverty ($MEPI = 0.65$) in 2015. This improvement was however accompanied by increased inequalities among population, since it was found that 84% of the sampled households is still living below the poverty line (headcount ratio - H), compared with 98% of the earlier assessment (2009), and are deprived from 78% of basic energy services (Intensity of energy poverty - A).

Biomass (wood and charcoal) is the main energy source used to satisfy energy needs on cooking (92% of the sampled households use wood and charcoal for cooking), the use of modern cooking fuels (natural gas, electricity, coal/lignite, and biogas) is incipient and it is all concentrated in urban areas. Almost 50% of households deprived of modern cooking fuels are exposed to indoor pollution; the other 50% also use traditional biomass but cook food outdoors.

It was also found that almost 80% of the sampled households did not have a refrigerator, and at least 60% and 50% of households were deprived of entertainment/education appliance ownership such as television and radio in 2015, respectively, 15% of these households have access to the grid, so, one may speculate that at least 15% of appliances' deprivations may result from a lack of ability to afford. The other 85% of deprivations could be attributed to the lack of access to electricity. Therefore, it is suggested that energy poverty

might be both lack of access and lack of capacity to afford for energy services that are necessary to fulfill basic needs.

The poorest province is Zambézia followed by Nampula and Cabo Delgado with MEPI scores of 0.79; 0.77 and 0.76, respectively, and intensity of energy poverty of 0.83, 0.84 and 0.79, respectively. The energy poorest provinces are also the most populous ones, with 19.6%, 18.7% and 8.7% of population for Nampula, Zambézia respectively.

Finally, changes to the method are proposed in order to highlight the relevance of productive uses of energy that might upgrade the economic and social effects of access to electricity for energy poverty alleviation and economic development.

Key-words: Energy poverty, Poverty alleviation, Development.

INTRODUÇÃO

A pobreza é um problema alarmante, que afeta principalmente os países em desenvolvimento, como é o caso de Moçambique. De acordo com Sher et al. (2014), a pobreza pode manifestar-se pela falta de alimentos, recursos naturais, roupa, abrigo, entre outros.

Embora a maior parte da literatura empírica relacione a pobreza com a produção e o rendimento, alguns estudos a relacionam com o acesso e consumo de serviços modernos de energias fiáveis, limpas, baratas (veja, por exemplo, Edoumiekumo et al., 2013; Khandker et al., 2011; Nussbaumer et al., 2013; Pachauri et al., 2004; Sovacool, 2012; Sher et al., 2014).

Em 2012, a Assembleia Geral das Nações Unidas reconheceu que a energia está relacionada com o desenvolvimento humano e a redução da pobreza ao declarar os anos 2014-2024 como sendo a década de energia sustentável para todos, o que reforçou a importância de dar apoio ao 1,3 bilhão de pessoas que até então viviam sem acesso à eletricidade e aos quase 2,6 bilhões que dependem da biomassa tradicional para satisfazer as suas necessidades de energia para cozinhar (WEO, 2011, 2012). Atuais projeções mostram que até 2030, cerca de 600 a 800 milhões de pessoas estarão ainda sem acesso a eletricidade no Pacífico Sul e África Subsaariana (Pachauri et al., 2018; REN21, 2018).

Foi apenas em 2015, com a adoção dos Objetivos das Nações Unidas para o Desenvolvimento Sustentável, que a energia foi política e globalmente reconhecida como um fator essencial para o desenvolvimento humano. Adotando os objetivos de desenvolvimento sustentável, 193 países, incluindo Moçambique, comprometeram-se a assegurar o acesso universal à energia moderna, confiável, barata e sustentável até 2030 (IEA, 2017).

Assim, a energia parece ser um fator chave para a prossecução dos objetivos relacionados aos desafios atuais para o desenvolvimento, tais como, pobreza, desigualdades, mudanças climáticas, segurança alimentar, saúde, educação e desemprego. Autores como Bensch Gunther, (2013) e Sher et al. (2014) consideram que a energia pode aumentar o bem-estar global ao melhorar serviços relacionados com saúde, educação e nutrição e, portanto, corresponde ao primeiro passo para o desenvolvimento de qualquer nação.

Embora alguns serviços modernos de energia, tais como transporte, aquecimento e arrefecimento nas casas, comunicação, entretenimento e educação, sejam tomados como garantidos nos países desenvolvidos, eles se constituem um desafio grande para os países em desenvolvimento e permanecem não disponíveis para uma vasta gama de pessoas nesses países (Nussbaumer et al., 2013).

Assim, a falta de acesso à energia é um problema que preocupa os países em desenvolvimento, como Moçambique, onde 75% da população não tem acesso à eletricidade e a biomassa constitui a principal fonte de energia (Mahumane & Mulder, 2019).

O uso tradicional da biomassa provoca riscos para a saúde devido à poluição gerada pela sua queima tradicional e em espaços sem ventilação apropriada, contribui para a desflorestação e a coleta de lenha é um trabalho demorado, que mantém as famílias rurais, principalmente as mulheres e crianças em idade escolar, longe de outras atividades benéficas, como educação e aquelas suscetíveis de gerar rendimentos (Saghir, 2005).

Assim, o uso de combustíveis modernos pode contribuir para a redução do uso tradicional da biomassa, o que em seu turno reduz os riscos à saúde (provenientes da queima tradicional da biomassa), a desflorestação e poupa o tempo despendido em atividades de coleta de lenha, além de melhorar os serviços de transporte, telecomunicação, educação, e dar oportunidade às pessoas de engajarem-se em atividades de geração de renda contingentes à disponibilidade de eletricidade para tomarem lugar (usos produtivos de energia) (Sher et al., 2014).

Nussbaumer et al. (2012) não só relacionam a pobreza com a energia, como também enfatizam a natureza multidimensional da pobreza energética e a necessidade de capturar os seus vários elementos para que efetivamente reflitam a complexidade existente na relação entre o acesso aos serviços modernos de energia e o desenvolvimento humano.

Tal como em outras regiões, apesar da importância da energia para o desenvolvimento económico e a redução da pobreza, estudos sobre pobreza em Moçambique focam-se mais na pobreza relacionada com baixo rendimento e, por isso, estudos focados em pobreza energética no país parecem escassos.

De acordo com Nussbaumer et al. (2012; 2013), Moçambique é um país que sofre de pobreza energética aguda, com um Índice Multidimensional de

Pobreza Energética (MEPI) igual a 0,87 (2012) e 0,82 (2013). Estes estudos fornecem comparações dos níveis de pobreza energética de diversos países, no entanto, não fornecem informações detalhadas sobre as diferentes dimensões que compõem o índice e nem em termos regionais e provinciais.

Num estudo usando cinco métricas unidimensionais, para seis países da África Subsaariana, tais como Benim, Burkina Faso, Senegal, Moçambique e Ruanda, Mensch (2013) mostrou que esses países eram caracterizados por um baixo consumo de energia, o que pode revelar restrições na procura e sintomas de pobreza energética.

Sendo Moçambique um dos países que adotou os objetivos de desenvolvimento sustentável, comprometeu-se a assegurar o acesso universal à eletricidade até 2030, portanto, esforços têm sido empreendidos para aumentar o acesso à eletricidade no país, tanto nas zonas urbanas, quanto nas rurais; no entanto, questões de fiabilidade e dos custos de acesso continuam sendo os maiores desafios para o sector energético no país.

A pobreza energética no país pode ser considerada tanto como um problema de falta de acesso como também um problema da falta de capacidade de pagamento pelo acesso e uso, o que reforça a importância da disponibilidade de energia para usos produtivos e a consideração da diferença entre o custo do acesso e o custo do uso dos serviços de energia.

Assim, este trabalho tem por objetivo medir a extensão do nível de pobreza energética no país usando a abordagem multidimensional da pobreza energética, assim como o impacto das suas diferentes dimensões em níveis nacional e provincial.

Ao medir o Índice Multidimensional de Pobreza Energética em Moçambique, este estudo irá prover informações detalhadas que podem ajudar na identificação da população energeticamente pobre, a magnitude e a intensidade da pobreza energética no país, informações que poderão ajudar os formuladores das políticas económicas a desenharem estratégias políticas e financeiras que ajudem a reduzir a pobreza.

Adicionalmente, a medida pode ser utilizada para monitorar o progresso e a eficácia das políticas implementadas, assim como para melhorar as formas de atuação no combate à pobreza no país.

REVISÃO DE LITERATURA

DEFINIÇÃO DE POBREZA ENERGÉTICA

Embora a pobreza energética venha se tornando uma preocupação na agenda política e de pesquisa dos países desenvolvidos e em desenvolvimento, tem sido difícil chegar-se a um consenso no que diz respeito à sua definição,

podendo ter significados diferentes dependendo do nível de desenvolvimento e das questões culturais, geográficas e climáticas dos países em causa.

Neste contexto, para Liddel et al. (2012), indivíduos, famílias ou grupos de pessoas são considerados energeticamente pobres quando estão privados de recursos necessários para pagar condições de casas razoavelmente aquecidas e iluminadas a um nível aceitável na sociedade a que pertencem.

De acordo com IEA (2014), pobreza energética consiste numa situação na qual as famílias têm acesso técnico à energia, mas não podem pagar por serviços adequados para satisfazer as suas necessidades básicas em energia.

Autores como Khandker et al. (2011) consideram a pobreza energética como um ponto no qual as pessoas usam uma quantidade mínima de energia (proveniente de todas fontes) necessária para satisfazer as necessidades humanas e sustentar a vida. De acordo com Eguino (2015), muitas abordagens definem pobreza energética como sendo a quantidade mínima de energia física necessária para satisfazer as necessidades básicas, tais como cozinhar e iluminação.

Contudo, estas definições são muito específicas do local e globalmente difíceis de serem aplicadas devido à falta de consenso sobre qual é a quantidade mínima de energia para diferentes regiões e países.

Assim, dependendo do âmbito económico (em termos de nível de desenvolvimento), o termo “pobreza energética” pode referir-se a duas condições socioeconómicas diferentes (veja Herrero, 2017 e Maxim et al., 2016), podendo referir-se a questões de custos dos serviços energéticos para os países desenvolvidos e à falta de acesso a serviços modernos de energia para países em desenvolvimento.

Enquanto os países desenvolvidos entendem pobreza energética como casas frias e a falta de capacidade de pagar por serviços de energias que permitem que o ser humano goze de um nível de vida minimamente confortável, o mundo em desenvolvimento entende a pobreza energética como a falta de acesso a serviços modernos de energia.

Assim, para definir a pobreza energética no contexto dos países em desenvolvimento, sublinhamos a definição de Sher et al. (2014), que definem pobreza energética como sendo a situação na qual não se pode escolher aceder a serviços de energia adequados, confiáveis, baratos, seguros e ambientalmente sustentáveis para suportar o desenvolvimento económico e humano. Esta definição é adotada neste estudo por incorporar elementos que caracterizam a natureza multidimensional da pobreza energética nos países em desenvolvimento.

A definição em causa considera que, para além de uma certa quantidade de energia, a pobreza energética é a falta de possibilidade de escolha, isto é, por serem energeticamente pobres, as pessoas estão privadas das possibilidades de escolher entre as diferentes opções que as permitam obter e criar bem-estar no seu sentido mais lato.

Devido à falta de acesso à energia, as famílias não só ficam privadas do acesso a serviços básicos de energia para a cozinha, a iluminação e o aquecimento das casas, mas também a serviços considerados fundamentais para o desenvolvimento individual e coletivo, tais como acesso à educação, saúde, informação e participação na política (Eguino, 2015).

Para além da falta de possibilidade de escolha, a pobreza energética impõe penalidades às pessoas energeticamente pobres, no sentido de que as pessoas que não têm acesso à energia pela rede nacional pagam mais pelos recursos alternativos de energia com qualidade mais baixa em relação às pessoas que têm acesso técnico à rede nacional (Groh, 2014).

A definição também inclui as ideias de fiabilidade e custo dos serviços de energia, aspetos importantes para os países em desenvolvimento, onde os preços dos serviços de energia continuam acima das capacidades de pagamento da maior parte da população e, portanto, a falta de capacidade de pagamento exclui as pessoas que têm acesso técnico aos serviços de energia mas que não podem, no entanto, pagar por uma quantidade mínima de energia para satisfazer as suas necessidades básicas.

Assim, falar de pobreza energética em países em desenvolvimento é buscar formas de lidar com aspetos relacionados com segurança, sustentabilidade, disponibilidade e acessibilidade, que muitas vezes são dados como garantidos nos países desenvolvidos.

SITUAÇÃO ENERGÉTICA EM MOÇAMBIQUE

POTENCIAL ENERGÉTICO POR RECURSO

Moçambique tem grande potencial em recursos energéticos, renováveis e não renováveis (veja a Tabela 1), é um dos maiores produtores de energia nos países da Comunidade de Desenvolvimento da África Austral - SADC (Cuvilas et al., 2010; IRENA 2012; WEC 2016).

A significativa disponibilidade de recursos energéticos permite que o país satisfaça não só as suas necessidades em energia, como também exportar para os países vizinhos da SADC e outros países ao redor do mundo (IRENA, 2012).

Com quase 129,6 trilhões de m³ de gás natural, nas províncias de Inhambane, Sofala e Cabo Delgado, o país possui a quarta maior reserva de gás natural do mundo, maior do que as de Angola e Nigéria (Cuvilas et al., 2010, ALER, 2017; World Bank Group, 2015a).

Com uma capacidade de produção instalada de cerca de 3,1 bilhões de m³/ano, mais de 90% da produção é exportado para a vizinha África do Sul.

Até 2014 apenas 3,4% da produção nacional era consumido dentro do país (Cuvilas et al., 2010; ALER, 2017).

TABELA 1. Potencialidade energética moçambicana por recurso.

Potencialidade energética por recurso				
Tipo de recurso	Localização	Reservas	Potencialidade das reservas	Capacidade instalada
Não renováveis	Tete	Carvão	2,4 bilhões	14 milhões toe/ano
	Inhambane, Sofala e Cabo Delgado	Gás Natural	129,6 trilhões de m ³	3,1 bilhões dem ³ /ano
	Cabo Delgado	Petróleo	2 Mt*	-
Renováveis	Todo o país	Hidro	2187MW/ano	1200 MW/ano
		Eólica	5GW	1,145MW
		Solar	5,4kWh/m2/dia	599MW
		Biomassa	2GW	-

*Reservas confirmadas.

FONTE: Cuvilas et al. (2010); IRENA (2012); WEC (2016); World Bank Group (2015a); ALER (2017); WEC 2016; Mahumane & Mulder (2019).

Em termos de carvão, Moçambique tem uma quantidade relativamente grande de reservas na província de Tete, estimadas em 2,4 bilhões de toneladas, com uma capacidade produção média instalada de 14 milhões de toneladas por ano, sendo que a maior parte dessa produção é exportada (Cuvilas et al., 2010).

Para além dos recursos não renováveis, o país possui um potencial de recursos renováveis (hidro, solar, eólico, biomassa e geotérmica) estimado em 23,026 GW (veja FUNAE, 2013). O mais explorado no país é a hidroenergia ao longo da bacia do Zambeze, que conta para mais de 50% de toda a eletricidade gerada no país.

Até 2015, a bacia do Zambeze, através da barragem de Cahora-bassa, tinha uma capacidade instalada de 2.187 MW e uma capacidade de geração de 1.200 GWh/ano. Cerca de 80 a 90% de toda eletricidade gerada nesta barragem é exportado para países vizinhos, tais como África do Sul e Zimbabwe (WEC, 2016; Mahumane & Mulder, 2019).

Adicionalmente aos recursos acima mencionados, Moçambique tem potencial significativo em energia solar e com uma capacidade instalada de 2,2MW (Relatório final de energia em Moçambique).

Existe um aspeto comum na exploração de todos os recursos energéticos em Moçambique: a maior parte da sua produção é destinada à exportação e apenas uma pequena parte é destinada ao consumo interno. Isto pode ser explicado pelo baixo nível de desenvolvimento e pela falta de infraestruturas desenvolvidas no país capazes de viabilizar a exploração desses recursos (Tester et al., 2012; WEC, 2016).

ACESSO À ENERGIA

Em 2015, a energia foi reconhecida global e politicamente como um fator essencial para o desenvolvimento humano com a adoção dos Objetivos das Nações Unidas para o Desenvolvimento Sustentável, onde 193 países comprometeram-se a assegurar o acesso universal à energia fiável, barata, sustentável e moderna até 2030 (IEA, 2017).

A prossecução de objetivos relacionados com igualdade de género, redução da pobreza, melhorias nos sectores da saúde e educação depende do acesso às formas modernas de energia e, portanto, é considerada um direito social fundamental e um elemento crítico para o desenvolvimento das sociedades (IEA, 2017; WEC 2016).

Dado que mais de 90% da exploração dos recursos energéticos no país destina-se à exportação, ficando uma pequena parte destinada ao consumo interno, o conceito de acesso à energia utilizado aqui refere-se ao acesso à eletricidade.

A falta de acesso a formas modernas de energia afeta desproporcionalmente a população, intensificando as desigualdades e posições sociais, a capacidade económica e os papéis definidos por género nas sociedades (IEA, 2017), algo que acontece mais nos países em desenvolvimento, onde as atividades como as de coleta de lenha e cozinhar são reservadas para as mulheres e crianças (Practical Action, 2016).

A dependência no uso da biomassa tradicional e o uso de fogões não eficientes afetam desfavoravelmente as mulheres e crianças nos países em desenvolvimento, onde essa parte da população gasta mais do seu tempo diário coletando lenha e cozinhando, expondo-se à poluição doméstica, ficando com menos tempo disponível do que os homens para se engajarem em outras atividades, tais como educação, atividades sociais e familiares.

Embora existam mulheres que fazem da coleta de lenha uma atividade de geração de renda, o acesso à energia moderna mostrou-se como um fator que influencia no aumento do nível de escolaridade das mulheres e da sua taxa de empregabilidade, formas importantes de reduzir a pobreza e as desigualdades de género (ECREEE, 2015; Dinkelman, 2011; Grogan & Sadanand, 2013; O'Dell et al., 2014).

O uso tradicional da biomassa, muitas vezes em espaços fechados e sem ventilação apropriada, contribui para a redução da qualidade do ar, gerando riscos para a saúde. Estima-se que cerca de 2,8 milhões de pessoas no mundo, e quase 0,8 milhões na África Subsaariana, morrem prematuramente devido à poluição do ar gerada pela queima tradicional da biomassa (IEA, 2017).

Estudos de Barron & Torero (2017) mostram que a eletrificação reduz a poluição doméstica e a prevalência de doenças respiratórias em crianças com

menos de seis anos de idade, o que contribui para o aumento do bem-estar humano.

Um outro aspeto importante consiste no fato de a falta de acesso a energias modernas, associada à baixa qualidade de energia quando disponível, afetar o funcionamento de clínicas e serviços de saúde, por gerar perdas de medicamentos devido à falta de sistemas de refrigeração, além de constantes avarias dos equipamentos elétricos e dos sistemas de refrigeração.

Cerca de 60% dos serviços de saúde na África Subsaariana não têm acesso à eletricidade e 28% têm acesso à eletricidade de baixa qualidade, o que gera perda de 50% das vacinas e avarias constantes em 70% dos equipamentos hospitalares (veja SE4ALL Africa, 2014; WHO & World Bank, 2014; UNEP, 2017 e WHO, 2010, todos citados em IEA, 2017).

De acordo com a REN21 (2018), o acesso à eletricidade continua sendo um grande desafio para os países em desenvolvimento em geral e para os países da África Subsaariana em particular. Em 2016, cerca de 2,8 bilhões de pessoas viviam sem acesso à eletricidade. Moçambique, sendo um país em desenvolvimento, tem uma situação de acesso à eletricidade que segue os padrões dos outros países em desenvolvimento. De acordo com os dados do Banco Mundial, até 2001 apenas cerca de 5,7% da população moçambicana tinha acesso à eletricidade da rede nacional operada pela Empresa Moçambicana de Eletricidade (EDM).

Esforços vêm sendo envidados para aumentar a taxa de acesso à eletricidade, o que levou a um aumento da taxa de eletrificação nacional de 5,7% em 2001 para 24,2% em 2016, (veja a Figura 1), podendo passar para 39% se incluirmos a eletrificação com o recurso a miniredes levadas a cabo pelo Fundo de Nacional de Energia – FUNAE (REN21, 2018).

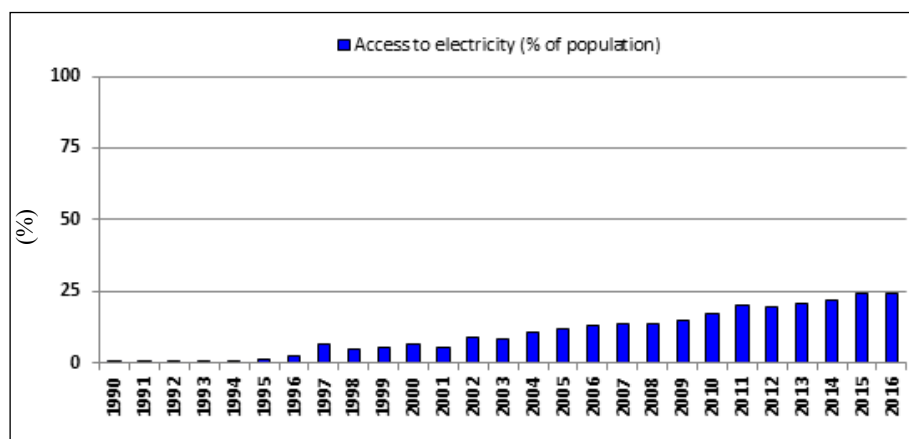


FIGURA 1. Evolução da taxa de acesso à eletricidade de 1994 a 2016.

FONTE: built from World Bank data.

A região sul (com províncias geograficamente menos extensas, uma densidade populacional média relativamente alta e onde localiza-se a capital do país) possui a taxa de eletrificação mais elevada, de cerca de 56,7%, sendo que as regiões centro e norte têm taxas de eletrificação relativamente equiparadas, de cerca de 16 e 17%, respetivamente, até 2015 (veja a Figura 2).

A Figura 2 mostra também uma tendência crescente da taxa de eletrificação na ordem dos 5% anuais para a região sul e 3% por ano para as regiões centro e norte. A tendência crescente da taxa de eletrificação reflete os esforços acima mencionados; contudo, a nível do país, cerca de 75% da população moçambicana continua vivendo sem acesso à eletricidade, o que mostra a necessidade de esforços adicionais para assegurar o acesso universal à eletricidade no país até 2030.

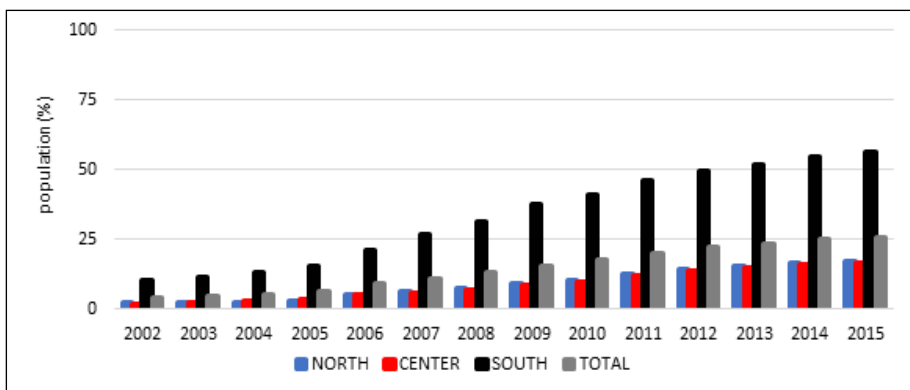


FIGURA 2. Evolução da taxa de eletrificação por região (%): 2002-2015.
FONTE: Construída a partir de dados do Relatório Estatístico anual da EDM, 2015.

ACESSO À ELETRICIDADE PARA USOS PRODUTIVOS

É importante notar que promover o acesso universal à energia é uma condição necessária, mas não suficiente, para gerar o desenvolvimento humano. Garantir que haja disponibilidade de energia barata e fiável para usos produtivos na agricultura (sector que emprega mais de 50% da população ativa no país), nas atividades comerciais (sector de autoemprego de uma boa parte da população), nas pequenas e médias empresas (uma das principais fontes de criação de emprego no país) e nos serviços de saúde e educação pode ser importante na geração de bens e serviços que, por sua vez, são suscetíveis de gerar rendimentos e melhorar os efeitos sociais e económicos do acesso à energia para o desenvolvimento humano (IEA, 2017).

Uma vez que a agricultura é um dos setores que empregam maior parte da população moçambicana, representando quase um quarto da produção do país, o nível do consumo de energia neste sector pode indicar, em termos ge-

rais, o nível de desenvolvimento do país. Uma vez que o uso de eletrobombas no processo de irrigação dos campos constitui a forma mais barata de irrigar os campos, a eletrificação pode desempenhar um papel crucial na industrialização da produtividade agrícola, assim como a transição da agricultura de subsistência para uma agricultura capaz de lutar contra a fome, que afeta a maior parte dos países em desenvolvimento, como Moçambique (Barnes & Binswanger, 1986; Rud, 2012).

Assim, o consumo de eletricidade no sector agrícola pode ser um bom indicador para medir o uso produtivo de energia na construção do índice de pobreza energética. De acordo com IEA (2017), a agricultura representa 18% do PIB na África Subsaariana e Índia e emprega 70% da população em alguns países da África Subsaariana.

Até 2007 Moçambique tinha cerca de 20 milhões de habitantes, dos quais sete milhões (correspondentes a 37%) eram economicamente ativos e 75% deles trabalhavam no sector da agricultura, que contribui para 23,5% do PIB moçambicano.

Assim como acontece com a taxa de acesso à eletricidade, também existe um forte crescimento no consumo de eletricidade para usos produtivos (veja a Figura 3). Contudo, embora a agricultura seja o sector que emprega maior parte da população ativa, é também o sector que menos consome eletricidade no país. O baixo consumo de eletricidade no sector agrícola pode ser explicado pelo facto de a agricultura praticada no país ser predominantemente de subsistência.

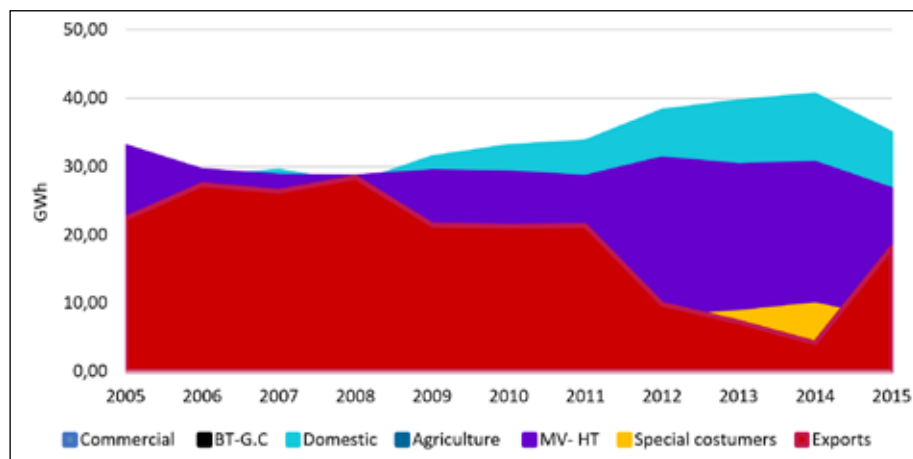


FIGURA 3. Evolução do consumo de eletricidade por sector de atividade (%) de 2005 a 2015.
FONTE: Construído a partir de relatório estatístico da EDM (2015).

O sector doméstico apresenta maior consumo de eletricidade, contando para cerca de 35% de toda eletricidade consumida no país em 2015. Isto pode

ser explicado pelo aumento da taxa de acesso à eletricidade, pelo uso de equipamentos eletrónicos não eficientes e pela falta de eficiência energética ativa (Nagaraju, 2018; Hongting et al., 2016).

Depois do sector doméstico, segue o setor dos clientes de eletricidade de média e alta tensão (MV-HT), onde enquadram-se os hospitais, por exemplo. Este sector representa 30% do consumo de eletricidade no país.

Em suma, o consumo de eletricidade no país baseia-se no sector doméstico e no sector de média e alta tensão, que emprega a menor parte da população, o que, em consequência, exclui a maior parte da população de participar de atividades produtivas.

Embora o sector energético seja um dos principais sectores da economia moçambicana (a exportação de energia sob forma de eletricidade, gás natural e carvão mineral gera divisas para o país), a falta de acesso e o baixo consumo de eletricidade para usos produtivos priva a população moçambicana de engajar-se em atividades de geração de rendimentos, fator que contribuiria para a melhoria dos impactos sociais e económicos do acesso à eletricidade para o desenvolvimento humano.

POBREZA E ENERGIA EM MOÇAMBIQUE

Embora Moçambique seja rico em recursos energéticos, o país faz parte do grupo das dez economias mais pobres no mundo, com 28,8 milhões de habitantes, dos quais 70% vivem com menos de 1,90\$ por dia (UNPD, 2015).

A literatura focada em pobreza energética em Moçambique é escassa. Nussbaumer et al. (2012), desenvolvendo o Índice Multidimensional de Pobreza Energética (MEPI), estimaram a intensidade da pobreza energética e a percentagem da população energeticamente pobre nos países africanos, usando os dados de inquérito demográfico e saúde de 2003, mostrando que 98% da população moçambicana era energeticamente pobre e privada de 89% dos serviços básicos de energia; apenas 11% das famílias moçambicanas tinham acesso à eletricidade (taxa de eletrificação) e 2,8% tinham acesso a combustíveis modernos para cozinhar.

Estudando os *insights* globais do índice multidimensional de pobreza energética, desta vez usando dados de inquéritos demográficos em saúde realizados em 2009, Nussbaumer et al. (2013) mostraram que o país continuava a sofrer de pobreza energética aguda, com 89% de famílias energeticamente pobres e privadas de 84% dos serviços básicos de energia. Contudo, devido à natureza do estudo, não havia informações detalhadas sobre a natureza e a extensão da pobreza energética em níveis regional e provincial do país.

Num estudo usando cinco métricas (uni e multidimensionais) para cinco países da África Subsaariana, nomeadamente Benim, Burquina Faso, Senegal, Ruanda e Moçambique, Bensch Gunther (2013) mostrou que, até 2008,

74% das pessoas nesses países não tinham acesso à eletricidade e apenas 5% das famílias rurais usavam eletricidade e combustíveis líquidos/gasosos como primeira fonte de energia para satisfazer as suas necessidades de energia na cozinha.

MÉTODO

O estudo irá usar a abordagem multidimensional da pobreza energética proposta por Nussbaumer et al. (2012) e criado pelo Oxford Poverty & Human Development Initiative (OPHI) em parceria com United Nations Development Program (UNDP) (Sher et al., 2014), para analisar e medir a pobreza energética em Moçambique, calculando o Índice Multidimensional de Pobreza Energética (MEPI).

O MEPI considera um conjunto de privações que podem afetar o estilo de vida de um indivíduo. O índice é, portanto, baseado em cinco indicadores: combustíveis modernos para cozinhar, poluição doméstica, acesso à eletricidade, posse de eletrodomésticos, a posse de aparelhos para educação e entretenimento, como a televisão e o rádio, e por fim os meios de telecomunicação.

Com esta métrica, um indivíduo ou família é considerado energeticamente pobre se a combinação das privações que sofre ultrapassarem um limiar de pobreza energética previamente e arbitrariamente escolhido, $k = 0,33$.

Se $c_i(k)$ representa o vetor das privações sofridas pela família i , e q o número de famílias energeticamente pobres, isto é, o número de famílias cujo total das privações que sofrem excedem k , então,

$$q = \sum_{i=1}^n c_i(k) \text{ se } c_i(k) > 0,33 \quad \text{Eq. 1}$$

A métrica permite-nos calcular o *headcount ratio* ($H = \frac{q}{n}$), ou percentagem das famílias energeticamente pobres e a intensidade da pobreza energética ($A = \sum_{i=1}^n \frac{c_i(k)}{q}$), isto é, a percentagem das privações sofridas pelas famílias energeticamente pobres e o MEPI como o produto entre o *headcount ratio* e a intensidade da pobreza energética ($\text{MEPI} = H \times A$).

O MEPI tem a vantagem de usar bases de dados já existentes e prover informações relevantes e detalhadas em níveis provincial, regional e nacional. Assim, para o presente estudo, a análise será efetuada usando dados do último inquérito demográfico em saúde (*Demographic and Health Surveys-DHS*), efetuado em 2015.

Contudo, apesar da vantagem de usar bases de dados já existentes, o MEPI é criticado por não considerar as fontes de acesso à energia (se é através

da rede nacional ou de minirredes), a qualidade da energia e não considerar a disponibilidade de energia para usos produtivos (uso de energia fora do ambiente familiar), além das diferentes fontes de energia (Pachauri et al., 2018).

Assim, para além de prover informações sobre a extensão da pobreza energética no país, o estudo fornecerá informações relevantes e mais detalhadas nas diferentes dimensões da pobreza energética tanto em nível nacional quanto provincial, informações que poderão ajudar os formuladores das políticas económicas a desenham estratégias e políticas direcionadas ao combate à pobreza no país.

INDICADORES DO MEPI

Dada a natureza multidimensional da pobreza energética, o MEPI define cinco indicadores que representam as privações básicas enfrentadas pelas famílias, tais como: energia usada para cozinhar, poluição doméstica, posse de eletrodomésticos (frigorífico, por exemplo), posse de aparelhos de educação, informação e entretenimento (rádio e televisão) e posse de meios de comunicação (telefone).

A necessidade do uso de energia para confeccionar alimentos constitui uma das necessidades primárias do ser humano. Assim, tal como é considerado em Nussbaumer et al. (2012) para capturar os elementos da pobreza energética relacionados às necessidades de energia para confeccionar alimentos, o estudo inclui o tipo de combustível usado como fonte de energia para cozinhar. O uso de combustíveis modernos pode estar relacionado com questões de capacidade de pagamento, isto é, ao contrário da biomassa (lenha e carvão vegetal), combustíveis modernos, tais como gás natural, LGP, eletricidade, petróleo e biogás, estão associados a custos monetários facilmente perceptíveis, que podem fazer com que mesmo as famílias com capacidade de pagar por eles continuem a usar a biomassa tradicional para satisfazer as suas necessidades de energia para cozinhar.

A evidência mostra que, apesar de muito tempo ser despendido na coleta de lenha (especialmente por mulheres e crianças) e a queima tradicional de lenha e carvão vegetal gerar riscos para a saúde, cerca de 2,5 bilhões de pessoas em todo o mundo continuam usando a biomassa tradicional mesmo tendo acesso aos combustíveis modernos e 2,8 bilhões vivem sem acesso a combustíveis modernos e mais limpos. Todas essas pessoas vivem expostas à poluição doméstica (IEA, 2017).

Assim, uma família é considerada energeticamente pobre na dimensão tipo de combustível que usa como fonte de energia para confeccionar os alimentos, se usa qualquer combustível que não seja eletricidade, LGP, petróleo, gás natural ou biogás. Assim, assume-se que a família *i* está exposta à poluição doméstica se for classificada como energeticamente pobre na categoria

tipo de combustível usado como fonte de energia para cozinhar e prepara alimentos dentro da casa ou em um compartimento fechado separado da casa principal. Esta última variável, em Nussbaumer et al. (2012), foi considerada para famílias que cozinham em fogões ou em lareira aberta usando qualquer combustível que não fosse eletricidade, LGP, gás natural ou biogás.

Em adição ao tipo de combustível usado como fonte de energia para confeccionar alimentos e poluição doméstica, é argumentado que o acesso universal à eletricidade é uma forma importante de assegurar a prossecução dos objetivos das Nações Unidas para o Desenvolvimento Sustentável (IEA, 2017). O acesso à eletricidade é também considerado em algumas sociedades como um direito social, portanto, é um elemento crucial para o desenvolvimento das sociedades na medida em que melhora as condições de educação, saúde, transportes, comunicações, produção e comércio (WEC, 2016).

A abordagem também inclui elementos relacionados com a posse de aparelhos para capturar informações de uso final de energia na educação e na comunicação que são contingentes ao acesso à eletricidade. Como é considerado em Nussbaumer et al. (2012), estes indicadores levam à consideração de variáveis relacionadas com a posse de aparelhos, tais como rádio, televisão e frigorífico, o que também traz à tona a noção de capacidade de pagamento (acessibilidade).

Embora o estudo reconheça o facto de esta abordagem não tomar em consideração a disponibilidade de energia para usos produtivos (uso não doméstico da energia), a qualidade e as fontes usadas para gerar energia/eletricidade, a falta de dados nestas variáveis faz com que o estudo limite a sua análise a questões meramente teóricas para estes aspetos.

Reconhecendo a importância relativa de cada um dos indicadores do MEPI, o estudo assume os pesos relativos considerados em Nussbaumer et al. (2012), conforme a Tabela 2.

No que diz respeito ao indicador telecomunicações, ao invés do que é feito em Nussbaumer et al. (2012), para este estudo foi apenas considerada a posse de telefone móvel como *proxy* para a variável telecomunicações, uma vez que apenas 2% dos inquiridos possui telefone fixo. Pelo fato do desenvolvimento das telecomunicações e da rede de telefonia móvel ter se expandido em quase todo o território nacional, considerar os dois tipos de telefone pode levar a uma supervalorização da variável.

TABELA 2. Pesos dos indicadores das dimensões do MEPI.

Dimensão	Indicador	Peso	Variável	Privações (pobre se...)
Cozinha	Combustíveis modernos para cozinhar	0,2	Tipo de combustível usado para cozinhar	Usa qualquer combustível que não seja eletricidade, LGP, petróleo, gás natural ou biogás
	Poluição doméstica	0,2	Alimentos confeccionados dentro da casa principal ou num compartimento separado da casa usando a biomassa tradicional	Verdade
Iluminação	Acesso à eletricidade	0,2	Tem acesso à eletricidade	Falso
Serviços obtidos pelo uso de aparelhos domésticos contingentes ao acesso à eletricidade	Posse de aparelhos domésticos	0,13	Tem frigorífico	Falso
Entretenimento/ Educação	Posse de aparelhos para educação e entretenimento	0,13	Tem rádio ou televisor	Falso
Meios de comunicação	Meios de telecomunicação	0,13	Tem telefone móvel	Falso

FONTE: Nussbaumer et al. (2012).

RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos para o MEPI em níveis nacional, provincial e regional e nas diferentes dimensões do índice para melhor perceção da intensidade e das dimensões da pobreza energética no país.

VISÃO GERAL DA POBREZA ENERGÉTICA EM MOÇAMBIQUE

Antes de apresentar os resultados principais do estudo, é importante apresentar uma visão geral das diferentes variáveis que caracterizam as diferentes dimensões que compõem o índice para melhor se perceber os resultados obtidos para o MEPI.

Em relação à variável tipo de combustível usado para confeccionar os alimentos, a lenha é a principal fonte de energia usada pelas famílias moçambicanas, representando 69% de famílias inquiridas, seguida de carvão vegetal, que representa 23,4% (veja a Figura 4). A figura também mostra que o uso de combustíveis modernos (gás natural, eletricidade e biogás) para confeccionar alimentos é muito baixo e está todo concentrado na província Maputo Cidade.

Em 2015, apenas 7% das famílias inquiridas usavam os combustíveis modernos para confeccionar alimentos.

Estes resultados podem, por um lado, ser explicados pelo facto de um pouco mais de 90% tanto de gás natural como de eletricidade destinarem-se à exportação para os países vizinhos, tais como África do Sul e Zimbábue, e, por outro lado, podem estar a refletir a existência de famílias com acesso físico a combustíveis modernos, mas que não podem pagar pelo seu uso.

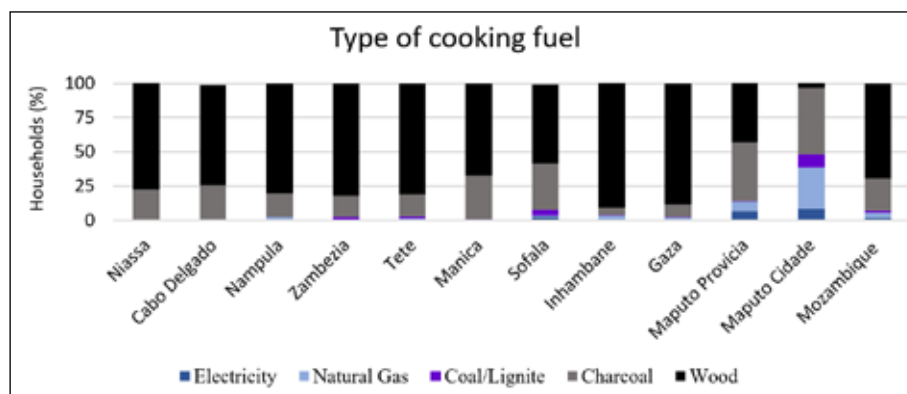


FIGURA 4. Tipo de combustível usado na confeção de alimentos em percentagem das famílias.

FONTE: Construído usando dados de inquérito demográfico da População e saúde.

Embora o uso da biomassa tradicional não seja considerado como a principal fonte de degradação do meio ambiente, contribui para a desflorestação, mudanças no uso da terra, emissões de gases estufa e riscos à saúde humana (Sovacool, 2012; Eguino, 2015).

Considera-se que uma família está exposta à poluição doméstica se usa biomassa tradicional como combustível para confeccionar alimentos e dentro da casa principal ou num compartimento separado. Neste âmbito, quase 50% das famílias privadas do uso de combustíveis modernos para cozinhar alimentos estão expostas à poluição doméstica e as outras 50% das famílias que usam a biomassa tradicional cozinham os alimentos emlareiras feitas ao ar livre (veja a Figura 5). Em relação ao indicador acesso à eletricidade, numa amostra de 7.170 famílias moçambicanas, 66% delas viviam sem acesso à eletricidade em 2015, das quais 53% viviam em zonas rurais (veja a Figura 6). Em nível provincial, Nampula e Gaza são as duas províncias que apresentam as menores taxas de acesso à eletricidade, com 70% de famílias vivendo sem acesso à eletricidade em cada uma delas, das quais 69% e 57% vivem em zonas rurais, respetivamente.

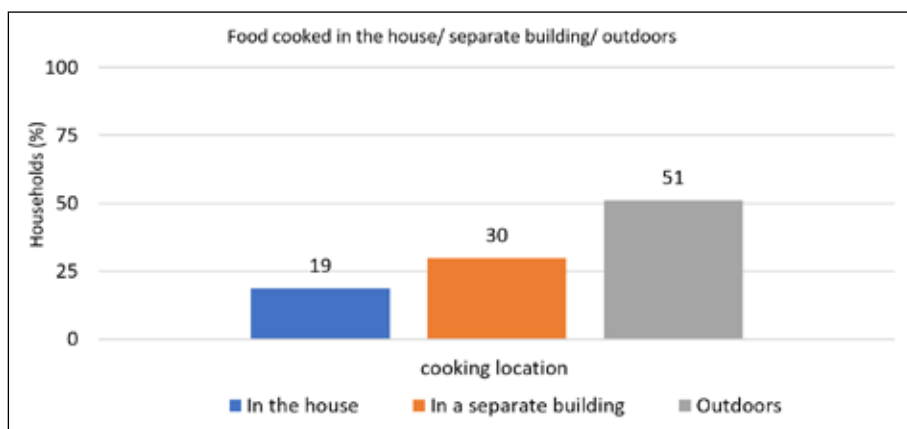


FIGURA 5. Poluição doméstica.

FONTE: Construído usando dados de inquérito demográfico da População e saúde.

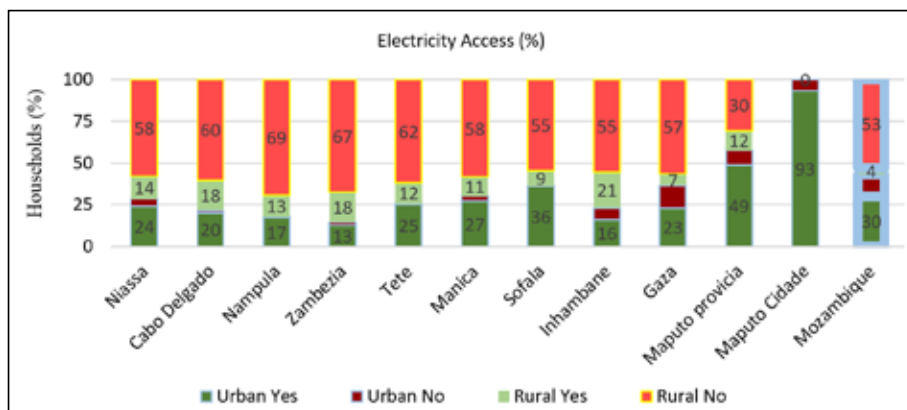


FIGURA 6. Taxa de acesso à eletricidade em níveis nacional e provincial.

FONTE: Construído usando dados de inquérito demográfico da População e saúde.

Mais de 50% das famílias em cada uma das outras províncias não têm acesso à eletricidade, com a exceção de Maputo Província e Maputo Cidade, com 39% e 7% de famílias vivendo sem acesso à eletricidade, respetivamente.

A baixa taxa de acesso à eletricidade para a população rural priva estas famílias de oportunidades de melhor educação escolar e saúde e limita o empreendedorismo em empresas e negócios que dependem do acesso à eletricidade para as actividades tomarem lugar. Este argumento é apoiado por Sovacool (2012), ao considerar que o acesso aos serviços modernos de energia contribui para o aumento de atividades suscetíveis de gerar rendimentos que, por sua vez, podem contribuir significativamente para a redução da pobreza.

Portanto, as pessoas que vivem sem acesso à eletricidade ficam privadas do desenvolvimento acadêmico e de atividades que as permitiriam gerar seus próprios rendimentos e são, assim, privadas de participar da produção do país (única forma viável de redistribuição da riqueza nacional), fator que contribui para o aumento e a perpetuação da pobreza e da pobreza energética nesses países.

A Figura 7 mostra que quase 80% das famílias inquiridas não tinham frigorífico e pelo menos 60% e 50% das famílias estavam privadas de aparelhos de entretenimento/educação, tais como rádio e televisor, respetivamente.

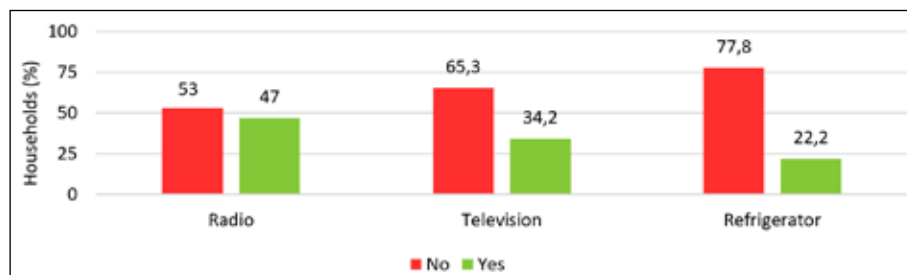


FIGURA 7. Posse de aparelhos de entretenimento/educação.

FONTE: Construído usando dados de inquérito demográfico da População e saúde.

Uma vez que 15% das famílias sem aparelhos de entretenimento/educação têm acesso à eletricidade, podemos especular que estas famílias podem não ter capacidade de pagar pelos aparelhos e a situação de 85% das famílias privadas destes meios pode ser explicada pela falta de acesso à eletricidade, uma vez que o funcionamento deles é contingente à disponibilidade de eletricidade (veja a Figura 8, abaixo).

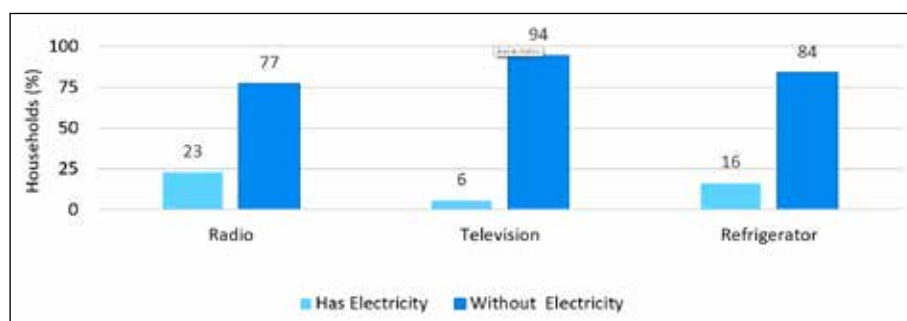


FIGURA 8. Posse de aparelhos de entretenimento/educação de acordo com a taxa de acesso à eletricidade.

FONTE: Construído usando dados do inquérito demográfico da População e saúde.

Quando as famílias são privadas dos meios de entretenimento como o rádio e a televisão, elas terão restrições no acesso à informação, fazendo

com que lhes seja difícil entender o que acontece no seu próprio país e, sendo assim, excluídas de participar do processo de governação do seu próprio país.

Pode-se dizer que a pobreza energética coincide com a pobreza associada a baixos rendimentos e que o desenvolvimento humano depende do acesso aos serviços modernos de energia que, por sua vez, são contingentes à noção de acessibilidade de uso e do acesso e do uso de serviços modernos de energia capazes de satisfazer as necessidades básicas da população.

MEPI, *HEADCOUNT RATIO* E INTENSIDADE DA POBREZA ENERGÉTICA

Usando os dados moçambicanos do inquérito demográfico da População e saúde de 2015, o MEPI foi calculado em níveis nacional e provincial. Fixando um limite mínimo de pobreza energética $k = 0,33$, como é definido em Nussbaumer et al. (2012), as diferentes províncias são classificadas de acordo com o seu grau de pobreza energética, sendo considerada com pobreza energética aguda a região ou província que tiver um índice MEPI $> 0,9$ e pobreza energética moderada se o MEPI $< 0,6$.

Comparativamente com o estudo anterior (2009), Moçambique já não sofre de pobreza energética aguda, tendo um índice multidimensional de pobreza energética de 0,65 em nível nacional (veja a Figura 9).

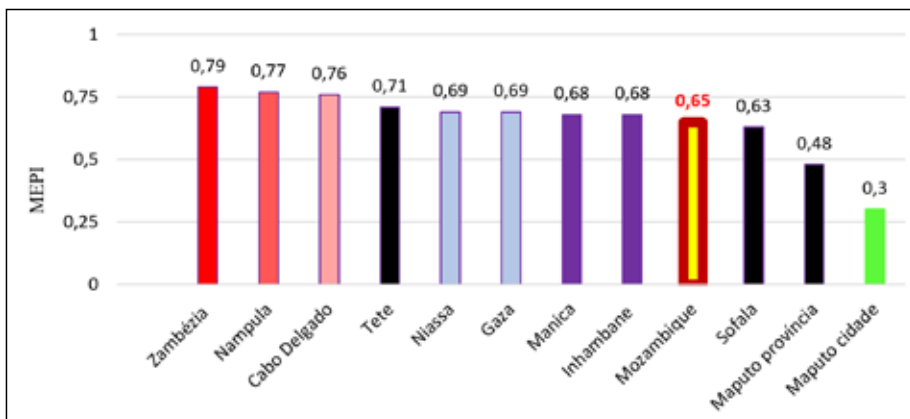


FIGURA 9. Resultados do MEPI a níveis nacional e provincial.

FONTE: Construído usando dados de inquérito demográfico da População e saúde.

Um MEPI de 0.65 mostra que em seis anos o país melhorou 20% comparativamente aos resultados obtidos com o inquérito efetuado em 2009, melhoramento resultante dos esforços que o país vem empreendendo para o aumento da taxa do acesso à eletricidade.

Contudo, apesar da melhoria no índice de pobreza energética, a Figura 10 mostra que 84% das famílias inquiridas (*headcount ratio* = 0,84) continuam abaixo da linha da pobreza (são energeticamente pobres); comparado com os 98% do estudo com os dados recolhidos em 2009, este resultado pode estar a mostrar que a melhoria no MEPI está acompanhada de maiores desigualdades entre a população.

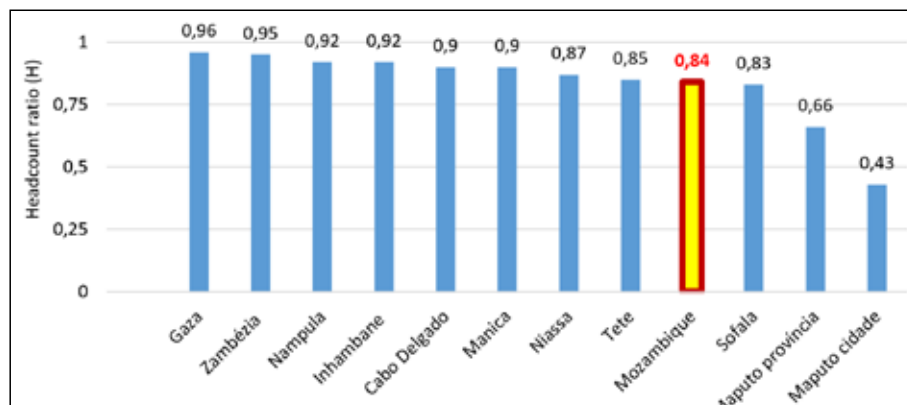


FIGURA 10. *Headcount ratio* (H) em níveis nacional e provincial.

FONTE: Construído usando dados de inquérito demográfico da População e saúde.

O nível das desigualdades acima mencionadas é também demonstrado pela intensidade da pobreza energética na Figura 11, onde mostra-se que 84% das famílias energeticamente pobres estão privadas de 78% (ou 0,78) dos serviços básicos de energia medidos pelos diferentes indicadores que compõem o MEPI.

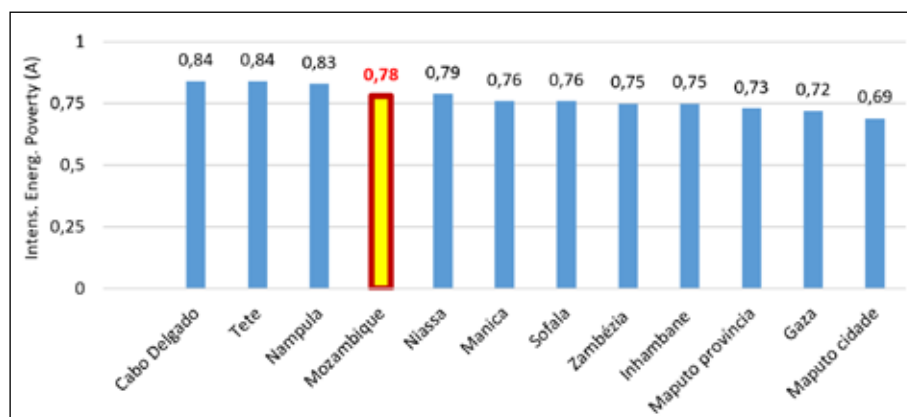


FIGURA 11. Intensidade da pobreza energética (A) a níveis nacional e provincial.

FONTE: Construído usando dados de inquérito demográfico da População e saúde.

O nível de intensidade de pobreza energética e das famílias energeticamente pobres demonstra a importância dos usos produtivos de energia como forma de gerar rendimentos que podem contribuir para a redução das desigualdades no país.

A melhoria no MEPI é explicada pelo aumento da taxa de acesso à eletricidade de 15% em 2009 para 25% em 2015 (veja a Figura 2 na Seção 2), complementado pela expansão das telecomunicações (tornada possível pela abertura do mercado à concorrência e pelo uso de fontes alternativas à rede nacional de distribuição de eletricidade, tais como geradores e painéis solares), que tornou possível que 70% da população residente tanto em zonas urbanas como em zonas rurais tivesse acesso aos serviços da rede de comunicação móvel.

Uma das críticas feitas à abordagem do MEPI consiste no facto de não tomar em consideração as diferentes fontes de energia que permitem que a população tenha acesso à eletricidade, fator que está refletido na variável telecomunicações, uma vez que famílias com ou sem acesso à eletricidade pela rede nacional têm acesso a telemóveis que são carregados com o recurso a painéis solares. Assim, o acesso à telecomunicação pode não constituir um bom indicador para medir a pobreza energética, uma vez que é de uso generalizado em todo o país, embora ainda exista uma indicação óbvia de pobreza generalizada.

Em nível provincial, a Figura 9 mostra também que a província de Zambézia é a mais pobre, seguida pelas províncias de Nampula e Cabo Delgado, com um MEPI de 0,79, 0,77 e 0,79 e intensidade de pobreza energética de 0,83, 0,84 e 0,79, respetivamente.

As províncias de Niassa e Gaza têm o mesmo MEPI de 0,69, contudo, Niassa é a que apresenta maior intensidade de pobreza energética, com 79% de privações e maior concentração de famílias energeticamente pobres em relação a Gaza, disparidades que não acontecem no caso das províncias de Inhambane e Manica, que têm o mesmo MEPI e valores aproximados de H e A.

Portanto, a melhoria no MEPI foi acompanhada por um aumento das desigualdades, o que coloca um desafio ao país no sentido de mostrar que assegurar o acesso universal à eletricidade baseada em serviços de iluminação doméstica não é condição suficiente para gerar o desenvolvimento humano e reduzir as desigualdades. O acesso à eletricidade para usos produtivos pode enaltecer os impactos económicos e sociais do acesso à eletricidade para o desenvolvimento humano e económico. Isto também mostra a necessidade de o planeamento energético no país tomar em consideração a diferença existente entre a acessibilidade no uso e no acesso aos serviços modernos de energia, onde mais uma vez os usos produtivos podem desempenhar um papel relevante.

Assim, a pobreza energética no país pode ser tanto por falta de acesso como por falta de capacidade de pagamentos dos serviços modernos de energia para a satisfação das necessidades básicas em energia.

CONCLUSÃO

A pobreza é um problema que afeta os países em desenvolvimento, como Moçambique, e a energia é apontada como um fator crucial para o alcance do desenvolvimento humano, com redução das desigualdades, da pobreza, do desemprego e melhorias nos serviços de educação e saúde.

Moçambique tem grande potencial de recursos energéticos renováveis e não renováveis (é um dos maiores produtores de energia na comunidade dos países da SADC) e esforços têm sido empreendidos para aumentar o acesso à eletricidade no país; contudo, cerca de 75% da população moçambicana continua vivendo sem acesso à eletricidade.

De modo a prover informações reais e detalhadas sobre a situação da pobreza energética no país, este trabalho calculou o índice multidimensional de pobreza energética (MEPI) usando dados do inquérito demográfico da População e saúde (*DHS survey*) efetuado em Moçambique no ano 2015.

Os resultados do estudo mostram que, com um MEPI de 0,65 em 2015, o país não sofre mais de pobreza energética aguda comparativamente com o estudo efetuado com dados de 2009. No entanto, esta melhoria não é uniformemente distribuída pelo país. Em nível nacional, 84% das famílias inquiridas são energeticamente pobres e privadas de 78% dos serviços de energia medidos pelos diferentes indicadores do MEPI, e em nível provincial, Zambézia é a província mais pobre em quase todos os indicadores, seguida pelas províncias de Nampula e Cabo Delgado, com um MEPI de 0,79, 0,77 e 0,76, respetivamente.

Mais de 70% das famílias inquiridas não têm acesso à eletricidade e o consumo de eletricidade dos outros 30% baseia-se em iluminação doméstica e não em usos produtivos; quase 90% das famílias usam biomassa tradicional como principal fonte de energia para confeccionar alimentos e o uso de combustíveis modernos, como eletricidade e gás natural, é ainda incipiente e é concentrado nas cidades.

A pobreza energética em Moçambique é tanto problema de falta de acesso como também um problema da falta de capacidade de pagamento dos serviços modernos de energia, o que reitera a importância dos usos produtivos de energia para o desenvolvimento económico e humano e a necessidade de políticas energéticas que tomem em consideração a diferença entre a acessibilidade do uso e acesso aos serviços de energia. Portanto, mudanças na metodologia são propostas de modo que a abordagem multidimensional da

pobreza energética possa incorporar o uso produtivo de energia como forma de melhorar os efeitos económicos e sociais do acesso à energia para o desenvolvimento humano.

AGRADECIMENTOS

A autora Mendita Arnaldo Ugembe agradece o apoio recebido da GALP para participar do evento.

REFERÊNCIAS

- Afonso, J. L. & Martins, J. S. (2004). Qualidade de Energia Elétrica. *Revista O Electricista*, 9, 66-71.
- ALER (2017). *Energias Renováveis em Moçambique*. Relatório nacional do Ponto de Situação.
- Apere, T. O. & Karimo, T. M. (2014). Multidimensional Energy Poverty in Nigeria: A national and Zonal levels Analysis. *British Journal of Advanced Academic Research*, 3, 83-92.
- Barnes, D. F., & Binswanger, H. P. (1986). Impact of Rural Electrification and Infrastructure on Agricultural Changes. *Economic and Political Weekly*, 21, 26-34. Available in: https://www.jstor.org/stable/4375175?seq=1#page_scan_tab_contents, accessed on 28/02/2019.
- Bartl, M. (2009). The Affordability of Energy Supply. *Eric Stein Working Paper*.
- Barron, M., & Torero, M. (2017). Household electrification and indoor air pollution. *Journal of Environmental Economics and Management*, 86, 81–92. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2017.07.007>
- Bensch, G. (2013). Inside the Metrics - An Empirical Comparison of Energy Poverty Indices for Sub-Saharan Countries. *Ruhr Economic Papers*, 464.
- Bhatia, M. & Angelou, N. (2015). *Beyond Connections Energy Access Redefined*. World Bank Group, 1-224.
- Bouzarovski, S. (2014). Energy Poverty in the European Union: Landscapes of vulnerability. *WIREs Energy Environment*, 3, 276-289.
- Bouzarovski, S. & Petrova, S. (2015). A global perspective on domestic energy deprivation: Overcoming the energy poverty-fuel poverty binary. *Energy Research & Social Science*, 10, 31-40.
- Cabraal, R. A. et al. (2005). Productive Uses of energy for Rural Development. *Annual Review Environment Resources*, 30, 117-144.
- Carmati, O. G. & Scalco, R. P. (2013). Relações de causalidade entre energia e crescimento económico no Brasil. *Revista Brasileira de Energia*, 19, 355-374.

- Culver, C. L. (2017). *A framework for understanding the role of Natural Gas in reducing energy poverty*. Tech. Rep. Stanford, CA: Natural Gas Initiative, Stanford University, 1-39.
- Cuvilas, C. A. et al. (2010). Energy Situation in Mozambique: A review. *Renewables and Sustainable Energy Reviews*, 14, 2139-2146.
- Dinkelman, T. (2011). The Effects of Rural Electrification on Employment: New Evidence from South Africa. *The American Economic Review*, 101, 3078-3108.
- Dwivedi, B. & Khalid, S. (2011). Power Quality Issues, Problems, Standards & Their Effects in Industry with Corrective Means. *International Journal of Advances in Engineering and Technology*, 1, 1-11.
- ECREEE. (2015). *Situation Analysis of Energy and Gender Issues in ECOWAS Member States*. ECOWAS Centre for Renewable Energy and Efficiency.
- Edoumiekumo, S. G. et al. (2013). Multidimensional Energy Poverty in the South-South geopolitical zone of Nigeria. *Journal of Economics and Sustainable Development*, 4.
- Eguino, G. M. (2015). Energy Poverty: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 47, 377-385.
- FUNAE. (2013). Atlas das Energias Renováveis de Mocambique.
- Goldemberg, J. (1998). Energia e desenvolvimento. *Estudos Avançados*, 12, 33.
- Goldemberg, J. (2004). The Case for Renewable Energies. *Thematic Background Paper*.
- Goldemberg, J. & Moreira, J. R. (2005). Política Energética no Brasil. *Estudos Avançados*, 19, 215-228.
- Goldemberg, J. & Lucon, O. (2007). Energias Renováveis: um futuro sustentável. *Revista USP*, 72, 6-15.
- Grogan, L. & Sadanand, A. (2013). Rural Electrification and Employment in Poor Countries: Evidence from Nicaragua. *World Development*, 43, 252 - 265.
- Groh, S. (2014). The role of Energy in Development Process – The Energy Poverty Penalty: Case Study of Arequipa (Peru). *Energy for Sustainable Development*, 18, 93-99.
- Herrero, T. S. (2017). Energy Poverty Indicators: A Critical Method. *Indoor and Built Environment*, 6, 1018-1031.
- Hongting, M. et al. (2016). Application of Low Costs Active and Passive Energy-Saving Technologies in an Ultra-low Energy Consumption Building. *Energy Procedia*, 88, 807- 813.
- IEA. (2010). *World Energy Outlook 2010*. Paris: International Energy Agency.
- IEA. (2014). *Capturing the Multiple Benefits of Energy Efficiency*. Paris: International Energy Agency.
- IEA. (2017). *Energy Access Outlook*. From Poverty to Prosperity.

- INE. (2019). Instituto Nacional de Estatística - Moçambique, CountrySTAT, Food, and agriculture data network: <http://193.43.36.162/home.aspx?c=MOZ>, accessed on 02/27/2019.
- IRENA (2012). Mozambique Renewables Readiness Assessment.
- Khandker, S. et al. (2011). Energy Poverty in rural Bangladesh. *Energy Policy*, 39, 894-904.
- Liddel, C. et al. (2012). Measuring and monitoring energy poverty in the UK. National and regional perspective. *Energy Policy*, 49, 27-32.
- Mahumane, G. & Mulder P. (2019). Expanding versus greening? Long-term energy and emission transitions in Mozambique. *Energy Policy*, 126, 145-156.
- Maxim, A., Mihai, C., Apostoae, C. M., Popescu, C., Istrate, C., & Bostan, I. (2016). Implications and measurement of energy poverty across the European Union. *Sustainability*, 8(5), 1–21. <https://doi.org/10.3390/su8050483>
- Nagaraju, K. (2018). A review of Energy Consumption in Residential Sector in India; Possibilities for Energy Conservation. *IMPACT: International Journal of Research in Humanities, Arts and Literature*, 6, 375-384.
- Niu, S. et al. (2013). Electricity consumption and Human Development level: A comparative Analysis based on panel data for 50 countries. *Electrical Power and Energy Systems*, 53, 338-347.
- Nussbaumer, P. et al. (2012). Measuring Energy Poverty: Focusing on what matters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 231-243.
- Nussbaumer, P. et al. (2013). Global insights based on the Multidimensional Energy Poverty Index (MEPI). *Sustainability*, 5, 2060-2076.
- O'Dell, K. et al. (2014). *Women, Energy, and Economic Empowerment*. Applying a Gender lens to amplify the impact of energy access. Deloitte University Press.
- Okushima, S. (2017). Gauging Energy Poverty: A Multidimensional Approach. *Energy*, 137, 1159-1166.
- Okwanya, I. & Abah, O. P. (2018). Impact of Energy Consumption on Poverty Reduction in Africa. *Journal of Applied Statistics*, 9, 1025-1039.
- Ouedraogo, N. S. (2013). Energy Consumption and Human Development: Evidence from a panel data cointegration and error correction model. *Energy Elsevier*, 63, 28-48.
- Pachauri, S. & Spreng, D. (2011). Measuring and monitoring Energy Poverty. *Energy Policy*, 39, 7497-7504.
- Pachauri, S. et al. (2004). On Measuring Energy Poverty in Indian Households. *World Development*, 32, 2083-2104.
- Pachauri, S. et al. (2018). A critical Review of modern approaches for Multidimensional Energy Poverty measurement. *WIREs Energy and Environment*, 1-16.
- Paul, S. & Bhattacharya, R. N. (2004). Causality Between energy consumption and Economic Growth in India: A note on conflicting results. *Energy Economics*, 26, 977-983.

- Practical Action (2016). *Poor People's Energy Outlook*. Practical Action publication.
- Reddy, B. S. (2003). Overcoming the Energy efficiency gap in Indian's households' sector. *Energy Policy*, 31(11), 1117-1127.
- REN21. (2018). *Renewables. Global Status Report*. A comprehensive Annual Overview of the state of Renewable Energy.
- Renewable Energy Atlas of Mozambique, 1st edition 2014.
- Rud, J. P. (2012). Electricity Provision and Industrial Development. *Journal of Development Economics*, 97, 352- 367.
- Saghir jamal (2005). Energy and Poverty: Myths, Links, and Policy Issues. World Bank. Washington.
- Sher, F. et al. (2014). An investigation of a Multidimensional Energy Poverty in Pakistan: A province-level Analysis. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 4, 2014, pp.65-75.
- Sovacool, B. K. (2012). The political economy of energy poverty: A review of key challenges. *Energy for Sustainable Development*, 16, 272-282.
- Stern, D. I. (1997). Limits to substitution and irreversibility in production and consumption: Neoclassical Interpretation of ecological economics. *Ecological Economics*, 21, 197-215.
- Stern, D. I. (1999). Is energy cost an accurate indicator of natural resource quality? *Ecological Economics*, 31, 381-394.
- Stern, D. I. & Cleveland, C. J. (2004). Energy and economic growth. *Rensselaer Working paper in Economics*.
- Tester, J. W. et al. (2012). *Sustainable Energy: Choosing Among Options*. The MIT Press, second edition.
- Toman, M. A. & Jemelkova, B. (2003). Energy and economic development: An assessment of the state of knowledge. *Energy Journal*, 24(4), 93-112.
- UNDP. (2015). Human Development report. Work for Human Development
- Vera, I. L. (2007). Energy Indicators for Sustainable Development. *Energy*, 32(6), 875-882.
- WEC. (2016). World Energy Resources.
- WEO. (2011). *World Energy Outlook*. Paris: International Energy Agency.
- WEO. (2012). *World Energy Outlook*. Paris: International Energy Agency.
- Winkler, H. et al. (2011). Access and affordability of electricity in developing countries. *World Development*, 39, 1037-1050.
- World Bank. (2015a). The Republic of Mozambique. Mozambique Energy Sector Policy Note Energy Sector Policy Work.
- World Bank. (2015b). Global Economic Prospects: Having Fiscal Space and Using It. <https://data.worldbank.org/indicator/EG.ELC.ACCS.ZS> accessed on 18/12/2018

AMBIENTE E CLIMA

CARACTERIZAÇÃO SISMOTECTÓNICA DA REGIÃO DE ARRAIOLAS, SUL DE PORTUGAL

SEISMOTECTONIC CHARACTERIZATION OF THE REGION OF ARRAIOLAS, SOUTH PORTUGAL

Piedade Martins Wachilala¹
José Fernando Borges²
Bento António Fialho Caldeira³
Mourad Bezzeghoud⁴
Inês Rio⁵
Luís Manuel Henriques Matias⁶

RESUMO

A região de Arraiolos (Alentejo Central) tem sido afetada por uma sismicidade persistente de fraca magnitude (a maioria dos sismos $M < 4$), embora se encontrem alguns eventos de magnitude superior ($M > 4$). Esta actividade sísmica é superficial ($h < 20$ km) e localiza-se principalmente em torno da Aldeia da Serra. No dia 15 de janeiro de 2018, às 11:51 UTC, ocorreu o maior sismo instrumental registado naquela zona. Trata-se de um evento de magnitude (ML 4.9), localizado a nordeste de Arraiolos, próximo da Aldeia da Serra. A localização hipocentral, determinada pelo Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA), tem as seguintes coordenadas: 38,792 N e 7,932 W a 11 km de profundidade. Este evento foi seguido por uma sequência de réplicas com magnitude (ML) ≤ 3.5 . A sequência sísmica do evento principal foi monitorada pela designada rede sísmica temporária de Arraiolos, composta por 14 estações de banda larga (CMG 6TD, 30s) do ICT (Instituto de Ciências da Terra, Évora) e 21 estações de curto período (CDJ, 2.0 Hz) do IDL (Instituto Dom Luiz), distribuídas em torno do epicentro, num raio de aproximadamente 20 km. Neste trabalho apresentam-se os resultados preliminares da análise de dados efetuada no período de janeiro até maio de 2018. Para além da análise da distribuição espaço-temporal dos 430 eventos localizados, apresentaremos os mecanismos focais preliminares e alguns resultados inferidos da análise espectral das réplicas de maior magnitude, interpretada segundo o modelo de fonte pontual de Brune (1970) e equações de Kanamori & Anderson (1975). Dessa interpretação determinamos alguns parâmetros básicos característi-

1 Instituto Superior de Ciências de Educação da Huíla, Departamento de Ciências da Natureza, Angola; Instituto de Ciências da Terra, Universidade de Évora, Departamento de Física, Évora, Portugal. piedadewachilala@gmail.com

2 Instituto de Ciências da Terra, Universidade de Évora, Departamento de Física, Évora, Portugal. jborges@uevora.pt

3 Instituto de Ciências da Terra, Universidade de Évora, Departamento de Física, Évora, Portugal. bafcc@uevora.pt

4 Instituto de Ciências da Terra, Universidade de Évora, Departamento de Física, Évora, Portugal. mourad@uevora.pt

5 Instituto Dom Luiz, Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, Portugal. irio@fc.ul.pt

6 Instituto Dom Luiz, Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, Portugal. Immatias@fc.ul.pt

cos da fonte sísmica, tais como momento sísmico escalar (M_0), magnitude do momento (M_w), dimensão da fonte (r_0) e queda de tensão ($\Delta\sigma$) na região focal. Finalmente, tentamos correlacionar esses resultados com informações geológicas, geomorfológicas e geofísicas existentes.

Palavras-chave: Sismotectónica, Sequência sísmica, Rede sísmica, Análise espectral.

ABSTRACT

The Arraiolos zone (South Portugal) has been affected by apparently persistent seismicity of low magnitude (most earthquakes $M < 4$) and some events of higher magnitude ($M > 4$). This seismic activity is superficial ($h < 20$ km) and mainly located in Aldeia da Serra and surroundings. On 15 January 2018 at 11:51 UTC, an earthquake of 4.9 ML occurred in the Northeast of Arraiolos region near Aldeia da Serra village. The hypocentral location, determined by Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA), has coordinates 38.79 N, 7.93 W at 11 km depth. The focal mechanisms determined by P-wave first motion polarities and waveforms inversion indicate a dominance of strike-slip events with nodal plans near NS (left lateral) and EW (right lateral) directions. This event was followed by an aftershocks sequence with magnitude (ML) ≤ 3.5 . The seismic sequence of the main shock was monitored by named Arraiolos temporary seismic network, composed of 14 broadband stations (CMG 6TD, 30s) of the ICT (Institute of Earth Sciences, Évora) and 21 short-period stations (CDJ, 2.0 Hz) of the IDL (Instituto Dom Luiz), distributed around the epicenter, within a radius of approximately 20 km. In this work we present the preliminary results of the data analysis performed until May, 2018. In addition to the analysis of the spatio-temporal distribution of 430 localized events, we will present the preliminary focal mechanisms and also results inferred from spectral analysis of aftershocks largest magnitude, such as, scalar seismic moment (M_0), moment magnitude (M_w), source dimension (r_0) and the stress drop ($\Delta\sigma$). Finally, we try to correlate these results with existing geological and geomorphological information.

Key-words: Seismotectonic, Seismic sequence, Seismic network, Spectral analysis.

INTRODUÇÃO

A sismicidade da região de Arraiolos ocorre numa região recortada por numerosas falhas, localizadas no Maciço de Évora, junto à fronteira da bacia do Baixo Tejo-Sado (Figura 1b) (Wachilala, 2015), onde se destacam duas importantes estruturas geológicas, com evidência geomorfológica de actividade (S. Gregório e a Falha do Ciborro). O padrão da sismicidade nesta zona é

geralmente organizado por sequências, que parecem mostrar duas dinâmicas: a) enxame sísmico sem qualquer relação com qualquer evento de maior magnitude; b) um evento principal seguido por réplicas, como, por exemplo, o sismo de 15 de janeiro de 2018. De qualquer forma, trata-se de uma sismicidade superficial ($H < 15$ km) e de reduzida magnitude ($M < 4$).

Os primeiros trabalhos no âmbito do mecanismo focal foram feitos por Moreira (1991), Borges et al. (2000) e Borges (2003). Foi com base nesses resultados e no conhecimento da sismicidade que Araújo & Martins (2010) estabeleceram o primeiro modelo tectónico para a região de Arraiolos. Os dados dos mecanismos focais obtidos dos eventos de 1997 e 1998 (Figura 2) são do tipo *strike-slip*, que são compactáveis com o modelo tectónico proposto por Araújo & Martins (2010).

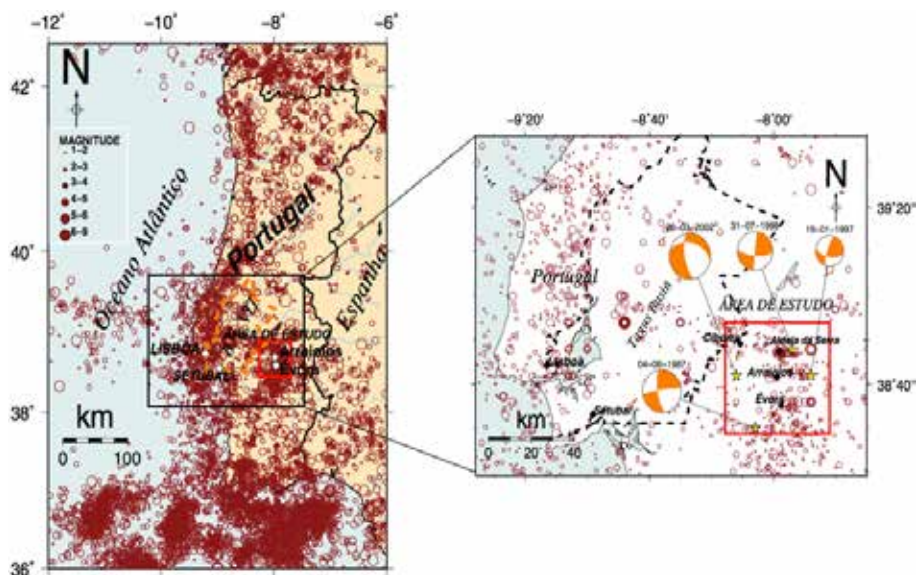


FIGURA 1. A) Sismicidade instrumental de Portugal Continental e margem atlântica para o período 1961-2018 (base de dados do IPMA). O rectângulo vermelho corresponde à região em estudo. B) Sismicidade instrumental (1961-2018) e a localização dos principais sismos históricos da área de estudo.

FONTE: Base de dados do IPMA. Tracejado a preto (Bacia do VIT - Vale Inferior do Tejo) e o rectângulo vermelho (área de estudo). Distribuição dos mecanismos focais dos eventos de 19 Janeiro de 1997; 31 Julho de 1998; 20 Março de 2002 e 04 de Junho de 1987.

No dia 15 de janeiro de 2018, às 11:51 UTC, ocorreu um terremoto de 4,9 ML na região nordeste de Arraiolos, perto da vila de Aldeia da Serra. A localização hipocentral, determinada pelo Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA), possui coordenadas 38,79 N, 7,93 W a 11 km de profundidade. Com o objectivo de monitorar a sequência sísmica deste evento, o ICT

(Instituto de Ciências da Terra, Évora), em parceria com o IDL (Instituto Dom Luiz), procedeu à instalação de 14 estações de banda larga (CMG 6TD, 30s) e 21 estações de curto período (CDJ, 2.0 Hz), totalizando 35 estações (Figura 2), denominadas rede sismográfica temporária de Arraiolos, cujas estações foram distribuídas ao redor do epicentro, num raio de aproximadamente 20 km.

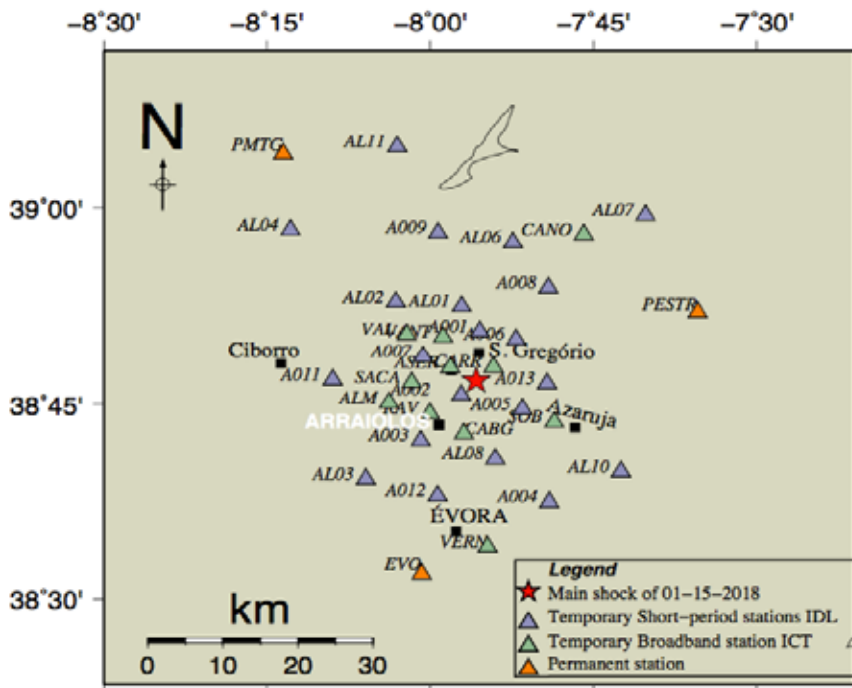


FIGURA 2. Distribuição das estações da rede sísmica temporária de Arraiolos em torno da região epicentral instalada após o sismo de Arraiolos de 15 de janeiro.

Os dados registados por estas estações e pelas estações de banda larga da rede permanente do IPMA (a laranja) foram usados neste estudo.

A introdução desta rede temporária, designada rede sísmica temporária de Arraiolos, traduziu-se na obtenção de maior número de dados sismológicos sem precedentes em Portugal e baixar o limiar de magnitude, resultando daí uma melhor caracterização da sismicidade e dos mecanismos focais desta região.

A deteção dos eventos sísmicos foi feita manualmente por meio da inspeção de espectrogramas diários do conjunto de estações em operação, ilustradas na Figura 2.

Foi detetado um total de 430 eventos identificados como tendo um número de fases adequados à sua localização e posterior análise. Este conjunto de 430 eventos foi em seguida filtrado de modo a conter apenas eventos com

seis ou mais leituras e um GAP inferior a 180° . Esta seleção reduziu a quantidade de eventos para 343. A localização preliminar foi feita usando um modelo de velocidades 1D retirado do modelo tomográfico publicado por Veludo et al. (2017) após um ajuste da razão VP/VS determinada pelos dados, que passou de 1.74 para 1.70 (Figura 3).

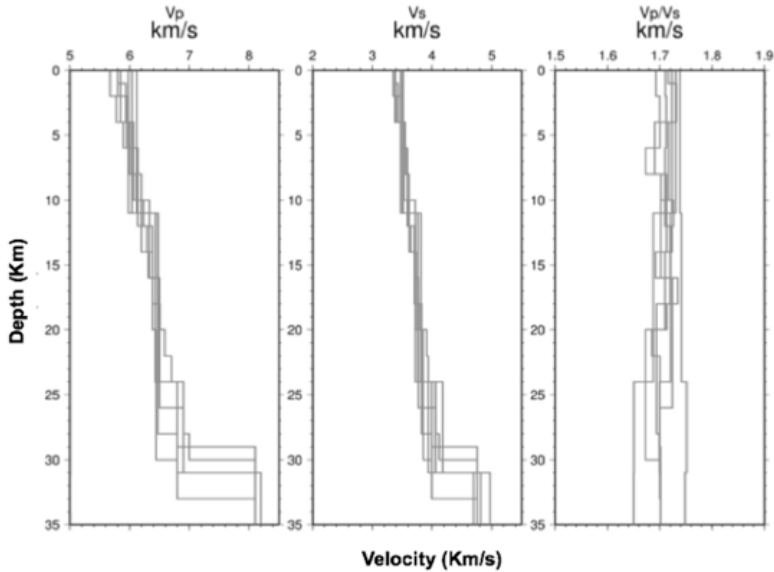


FIGURA 3. Modelo de velocidades 1D das ondas P e S, obtidos com a inversão VELEST.

SISMICIDADE E MECANISMOS FOCAIS DA SEQUÊNCIA SÍSMICA

Na Figura 4 apresenta-se a distribuição epicentral das réplicas na zona da Aldeia da Serra, que mostra a existência de dois aglomerados de eventos, um deles reunindo cerca de 2/3 dos microssismos. Estes aglomerados se distribuem seguindo as direções NE-SW e NW-SE. A secção vertical dos focos mostra que a profundidade focal nestes dois aglomerados e na restante sequência varia entre 11 e 15 km, com uma maior concentração aproximada aos 12 km. Calculamos o valor de b e as magnitudes de completitude (M_c) para a sequência sísmica, removendo os dois sismos de maior magnitude ($M_L = 3,5$ e $M_L = 4,9$). O resultado encontra-se na Figura 5.

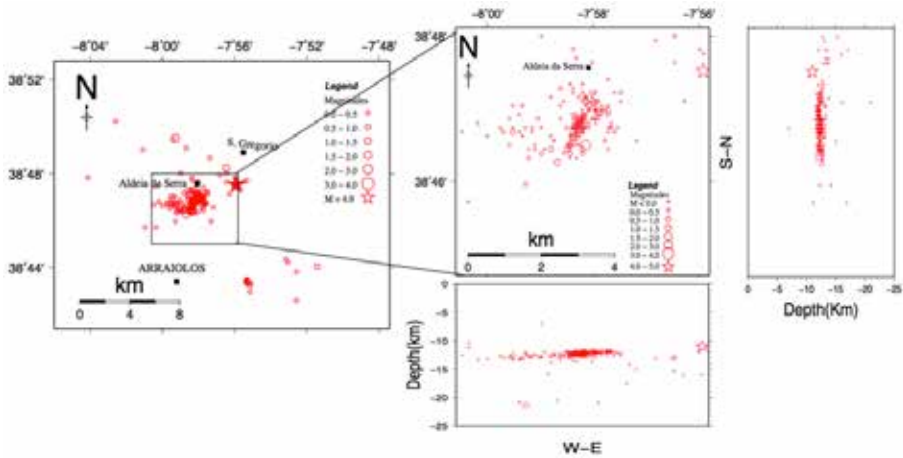


FIGURA 4. a) Distribuição epicentral da sequência sísmica (análise preliminar de dados efetuada no período de 15 de janeiro até 12 de maio de 2018). b) Distribuição epicentral da sequência sísmica numa zona mais restrita da figura a). A estrela corresponde ao sismo principal cuja localização hipocentral, foi determinada pelo Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA).

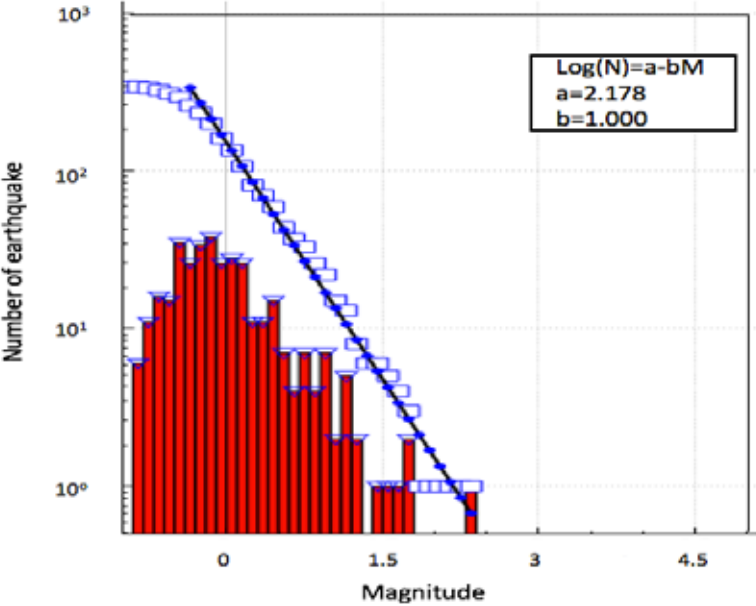


FIGURA 5. Distribuição de frequência-magnitude da relação Gutenberg-Richter (GR) para a sequência sísmica de Arraiolos.

Na Figura 6, apresenta-se a distribuição dos mecanismos focais de alguns eventos da sequência sísmica de 2018 determinados neste estudo e de alguns eventos regionais em torno da zona de estudo, mostrando a predo-

minância de mecanismos do tipo *strike-slip* com possíveis planos de falhas orientados de WNW-ESSE e SSW-NNE. Estes dados sugerem que a zona sísmica de Arraiolos (ZSA) trata-se de uma zona de cisalhamento do tipo desligamento lateral-direito (*strike-slip*).

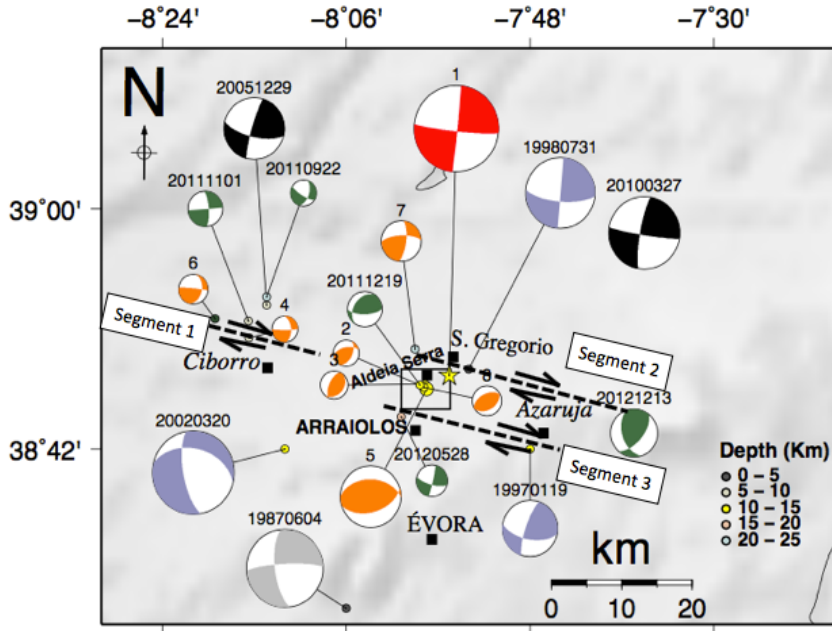


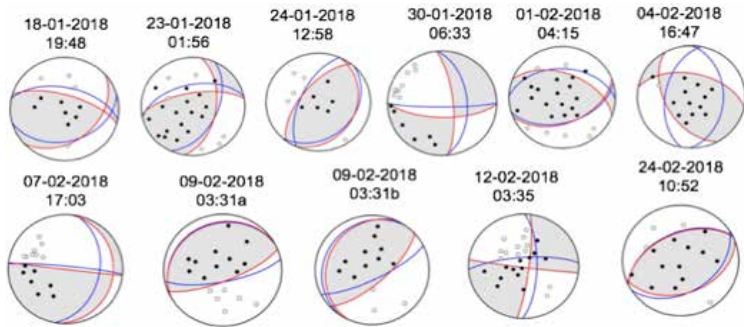
FIGURA 6. Proposta do modelo sismotectónico da zona sísmica de Arraiolos (ZSA). Estes resultados sugerem que esta zona constitui uma zona de cisalhamento do tipo desligamento lateral-direito (*strike-slip*) abrangendo três segmentos (linhas tracejadas pretas), baseado no mapa mundial de tensões 2016 (Heidbach et al., 2016). Mecanismos focais cinzentos determinados por Moreira (1991). Azul determinado por Borges (2003). Preto publicado em Custódio et al. (2015). Verde determinados por Matos et al. (2018). Vermelho (choque principal de 15-01-2018) determinado pelo IPMA (2018). Mecanismos focais Laranja determinados neste trabalho.

As soluções dos terremotos representados encontram-se na Tabela 1. Observa-se que o mecanismo focal do choque principal calculado por inversão da forma de onda ($M_w=4.3$) corresponde a soluções da falha de desligamento (*strike-slip*) que contrasta com a maior parte dos eventos cujo mecanismo focal pode ser calculado usando a polaridade das ondas P (Tabela 2), que apresentam um mecanismo de falha inversa ou inverso de desligamento.

TABELA 1. Soluções da sequência sísmica de 2018, determinadas pelas polaridades dos movimentos iniciais das polaridades da onda P.

Nº	Data (yy/mm/dd)	Hour (hh:mm)	Long. (°W)	Lat. (°N)	Depth (km)	Mag. (ML)	Strike	Dip	Rake
1	2018/01/18	06:55	-7.966	38.785	12.8	1.2	74.2	37.7	67.4
2	2018/01/23	01:56	-7.973	38.778	12.3	1.5	25.0	50.9	50.5
3	2018/01/24	12:58	-7.971	38.781	12.3	1.6	42.7	29.6	106.1
4	2018/01/30	06:33	-8.259	38.839	9.8	1.5	355.5	51.9	-7.1
5	2018/02/01	04:15	-7.969	38.775	12.4	3.5	271.6	42.8	103.7
6	2018/02/02	22:45	-7.974	38.775	12.3	1.0	290.0	17.4	78.1
7	2018/02/03	04:43	-7.971	38.780	12.6	1.0	264.2	21.4	89.3
8	2018/02/04	16:47	-7.973	38.779	12.1	1.3	1.1	40.1	82.8
9	2018/02/07	10:40	-7.969	38.785	12.3	1.0	169.7	40.4	71.7
10	2018/02/07	17:03	-8.314	38.863	24.6	1.7	10.8	40.5	6.9
11	2018/02/09	03:10	-7.974	38.773	12.7	1.1	242.4	17.6	74.5
12	2018/02/09	03:10	-7.975	38.774	12.7	1.2	214.8	16.1	62.2
13	2018/02/12	03:35	-7.988	38.825	21.3	2.3	268.0	67.2	158.5
14	2018/02/24	10:52	-7.973	38.777	12.3	1.7	57.6	41.3	85.1
15	2018/02/25	00:27	-7.967	38.787	12.4	1.0	41.1	35.8	124.0

TABELA 2. Mecanismos focais calculados para os eventos seleccionados, com polaridades da onda P representadas.



ANÁLISE ESPECTRAL

Nesta etapa preliminar, foram seleccionados três eventos para estimar os parâmetros espectrais das réplicas de maior magnitude interpretadas segundo o modelo de fonte pontual de Brune (1970) e equações de Kanamori e Anderson (1975). Desta análise foram determinados o momento sísmico escalar (M_0), a magnitude do momento (M_w), a dimensão da fonte (r_0) e a queda de tensão ($\Delta\sigma$), de acordo com as seguintes equações:

$$M_0 = \frac{4\pi c^3 R \Omega_0}{C_i F(f, \delta, \lambda, i_h)} \tag{1}$$

$$r_0 = \frac{2.34\beta_o}{2\pi f_{e(\alpha,\beta)}} \quad (2)$$

$$\Delta_\sigma = \frac{7}{16} \frac{M_0}{r_0^3} \quad (3)$$

$$Mw = \frac{2}{3} \log M_0 - 6.0 \quad (4)$$

Para o efeito, foram seguidos os seguintes procedimentos:

- Análise espectral dos registos nas suas componentes verticais (P vertical);
- Desconvolução do registo sísmico por meio da aplicação da função de transferência da estação;
- Cálculo do espectro de deslocamento, recorrendo à transformada rápida de Fourier (FFT);
- Selecção de janela temporal de alguns segundos contados um pouco antes da primeira chegada da onda P;
- Construção de um gráfico bi-logarítmico de amplitude, para as componente verticais, numa gama de frequências entre 1 a 50 Hz (limites espectrais) (Figura 7).
-

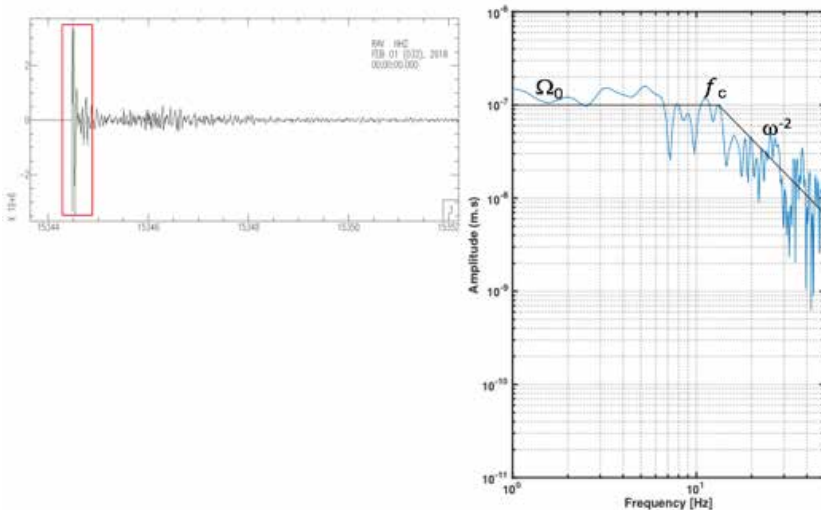


FIGURA 7. Registos verticais das ondas P assinaladas por rectângulo (em cima) e respectivo espectro em deslocamento (embaixo) da estação SACA, para o evento nº 1 ($M=3.5$).

Os resultados preliminares estão apresentados na Tabela 3 e mostram que há uma tendência de aumento da queda de tensão com o aumento do mo-

mento sísmico, à semelhança de resultados de outros estudos para eventos de baixa magnitude (Gibowicz & Kijko, 1994). A banda da frequência de corte observada situa-se entre os 9 - 16 Hz. Geralmente, a frequência de corte diminui com o aumento da magnitude de momento.

Entretanto, há necessidade de se ajustar os parâmetros de correcção das amplitudes sísmicas para a modelação dos espectros das restantes réplicas, de maneira a que estejam em conformidade com o modelo de Brune (1970).

TABELA 3. Parâmetros da fonte, obtidos a partir da análise espectral dos registos das estações de banda larga do ICT (componente vertical) para três eventos da sequência sísmica de Arraiolos de 2018.

Nº	Eventos (data)	Prof. (km)	MI	$\Omega_0(ms)$	$f_c(Hz)$	$M_0(Nm)$	M_w	$r_0(m)$	$\Delta\sigma(Pa)$
1	01-02-2018	12	3.5	9.6×10^{-7}	9.14	1.0×10^{14}	3.2	222.9	7.0×10^6
2	12-02-2018	21	2.3	1.2×10^{-8}	16.0	3.0×10^{12}	2.3	156.2	3.6×10^5
3	24-02-2018	12	1.7	4.0×10^{-9}	14.8	4.5×10^{11}	1.7	159.8	5.1×10^4

CONCLUSÕES

O choque principal e a respectiva sequência sísmica ocorreram numa zona de atividade microssísmica, já identificada nos trabalhos de Borges (2003), Wachilala (2015) e Matos et al. (2018), designada por Zona Sísmica de Arraiolos - ZSA.

A sequência sísmica segue a lei de Gutenberg-Richter com o valor de b igual a 1.0 e a magnitude de completude de -0,3. A localização desses eventos mostra uma concentração em dois grupos com magnitude entre -0,3 e 1,8 e uma concentração hipocentral significativa a 12 km de profundidade. Os mecanismos focais predominantes da sequência sísmica são do tipo de falha inversa, que contrastam com o mecanismo focal do choque principal (tipo *strike-slip*).

Os dados da sismicidade e dos mecanismos focais da região sugerem um esquema sismotectónico de uma zona de cisalhamento do tipo desligamento lateral-direito (*strike-slip*) coincidentes com os principais acidentes geológicos da região, concordantes com o modelo proposto por Araújo et al. (2010).

Em todos os espectros, não se verifica a existência de uma parte plana para as baixas frequências e um decaimento da amplitude espectral para

as altas frequências segundo ω^{-2} , em conformidade com o modelo de Brune (1970). Daí haver a necessidade de se ajustarem os parâmetros de correcção das amplitudes sísmicas para a modelação dos espectros das restantes réplicas. O objectivo final da determinação dos parâmetros da fonte da sequência sísmica é o de estabelecer relações de escalas entre M_l e M_w ; M_o e r_o ; M_o e Δ_o , de acordo com os modelos existentes.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi cofinanciado pela União Europeia por intermédio do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional, enquadrado no Programa COMPETE 2020, por meio do Projeto ICT (referência UID/GEO/04683/2019). Agradece-se igualmente à equipa de Arraiolos constituída por todos os membros do ICT, IDL e IPMA que participaram ativamente na instalação da rede sísmica e processamento preliminar de dados.

O autor Piedade Martins Wachilala também agradece o apoio recebido da GALP para participar do evento.

REFERÊNCIAS

- Araújo, A. & Martins, A. (2010). A elevação de Aldeia da Serra (Arraiolos): um “push up” activo associado à Falha de Ciborro e ao lineamento de S. Gregório? *Revista Electrónica de Ciências da Terra*. VIII Congresso Nacional de Geologia.
- Borges, J. (2003). *Fonte sísmica em Portugal*. Algumas implicações na Geodinâmica Açores-Gibraltar. [Tese de doutorado não publicada. PhD]. Universidade de Évora, Portugal. 307 p.
- Borges, J. F., Fitas A. J. S., Bezzeghoud, M. & Teves-Costa, P. (2000). Seismotectonics of Portugal and its adjacent Atlantic area. *Tectonophysics*, 337(2001), 373±387.
- Brillinger, D. R., Udias, A., & Bolt, B. A. (1980). A probability model for regional focal mechanism solutions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 70(1), 149-170.
- Brune, J. N. (1970). Tectonic Stress And The Spectra Of Seismic Shear Waves From Earthquake. *Journal of Geophysical Research*, 75, 4997-5009.
- Custódio, S., Dias, N. A., Carrilho, F., Góngora, E., Rio, I., Marreiros, C. et al. (2015). Earthquakes in western Iberia: Improving the understanding of lithospheric deformation in a slowly deforming region. *Geophysical Journal International*, 203(1), 127-145. <https://doi.org/10.1093/gji/ggv285>.
- Gibowicz, J. S. & Kijko, A. (1994). *An Introduction to Mining Seismology*. Academic Press, INC. III Series. Institute of Geophysics Polish. Poland: Academy of Sciences Warsaw.

Heidbach, O., Rajabi, M., Reiter, K. & Ziegler, M. (2016). *World Stress Map 2016*. Serviços de Dados GFZ. <http://doi.org/10.5880/WSM.2016.002>

IPMA (2018). *Mecanismo focal do Sismo de Arraiolos de 15 de janeiro de 2018*. Nota Técnica.

Kanamori, H. & Anderson, D. L. (1975). Theoretical basis of some empirical relations in seismology. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 65, 1073-1095.

Matos, C., Custódio, S., Batló, J., Zahradník, J., Arroucau, P., Silveira, G. & Heimann, S. (2018). An Active Seismic Zone in Intraplate West Iberia Inferred From High-Resolution Geophysical Data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(4), 2885-2907.

Moreira, V. S. (1991). *Historical seismicity and seismotectonics of the area situated between the Iberian Peninsula, Marrocco, Selvagens and Azores Islands*. Seismicity, Seismotectonic and Seismic Risk of the Ibero-Magrebien Region. Madrid: Publ. IGN, v. 8, p. 213±225.

Wachilala, P. M. (2015). *Sismotectónica da região Caborro-Arraiolos e sua relação com a Geomorfologia local*. [Dissertação de Mestrado não publicada]. Universidade de Évora. 115 p.

Veludo, I., Dias, N. A., Fonseca, P. E., Matias, L., Carrilho, F., Haberland, C. & Villaseñor, A. (2017). Crustal seismic structure beneath Portugal and southern Galicia (Western Iberia) and the role of Variscan inheritance. *Tectonophysics*, 717, 645-664.

TOMOGRAFIA DE REFRAÇÃO SÍSMICA APLICADA À ESTIMATIVA DO VOLUME DE SEDIMENTOS CONTAMINADOS POR METAIS PESADOS. O CASO DO CÓRREGO CONSCIÊNCIA-BRASIL

SEISMIC REFRACTION TOMOGRAPHY APPLIED TO ESTIMATE THE VOLUME OF SEDIMENTS CONTAMINATED BY HEAVY METALS. THE CASE OF CONSCIÊNCIA STREAM-BRAZIL

Osório de Cavacundo¹
José Fernando Borges²
Bento António Caldeira³
Rita Fonseca⁴
Alexandre Araújo⁵

RESUMO

As análises químicas feitas em amostras recolhidas na bacia do córrego Consciência revelaram elevados índices de contaminação por metais pesados, especialmente por Zinco, Chumbo e Cádmio, resultantes da acção industrial de metalurgia nas margens do rio São Francisco, no Estado brasileiro de Minas Gerais. Este facto levou à realização de uma campanha geofísica em agosto/setembro de 2014, com vista a elaborar modelos de velocidade que ajudaram a estimar a profundidade e o volume de sedimentos potencialmente contaminados, recorrendo à tomografia de refração sísmica. O presente trabalho apresenta os resultados da referida campanha geofísica. Foram então realizados oito perfis de refração sísmica, processados usando a técnica tomográfica WET (Wavepath Eikonal Traveltime), incorporada no *software* Rayfract da Intelligent Resources Inc. A tomografia WET (Wavepath Eikonal Traveltime) é uma metodologia que difere dos métodos tradicionais, resolvendo a equação eikonal de propagação da onda sísmica ao longo do percurso da onda por retroprojeção. A tomografia WET considera as primeiras chegadas, no caso, as ondas compressão P. Os resultados permitiram concluir que a profundidade dos sedimentos potencialmente contaminados varia entre os 2.5 e 4 metros, o

¹ Instituto Superior de Ciências da Educação da Huíla (ISCED-Huíla), osoriodecavacundo@gmail.com

² Instituto de Ciências da Terra (ICT), Escola de Ciência e Tecnologia, Universidade de Évora, jborges@uevora.pt

³ Instituto de Ciências da Terra (ICT), Escola de Ciência e Tecnologia, Universidade de Évora, bafcc@uevora.pt

⁴ Instituto de Ciências da Terra (ICT), Escola de Ciências e Tecnologia, Universidade de Évora, rfonseca@uevora.pt

⁵ Instituto de Ciências da Terra (ICT), Escola de Ciências e Tecnologia, Universidade de Évora, aaaraujo@uevora.pt

que permitiu calcular o volume pela regra 3/8 de Simpson em $(228.5 \pm 26.8) \times 10^3 \text{ m}^3$. O cálculo do volume foi obtido com recurso ao *software* Surfer 12, da Golden Software.

Palavras-chave: Sísmica de refração, WET.

EXTENDED ABSTRACT

In recent years, human society has come to realize that its anthropic actions have caused damage to the planet, and environmental studies have been conducted in various ways to assess the magnitude of this damage. Geophysics, being geoscience, does not abstain from these studies. Therefore, its application to environmental studies has been notorious and this work fits in this context. Its object of study is the sedimentary basin of the Consciência stream, near its mouth in the São Francisco river, in the city of Três Marias, Minas Gerais State, Brazil.

This region is geologically constituted by alternating quartz-feldspathic fine sandstones with sub-horizontal decimetric benches and siltstones. On this formation there are occasional alluvial deposits related to the current drainage network.

Geochemical studies in this region have revealed critical levels of heavy metal contamination resulting from an industrial metallurgical activity.

The general objective of this work is to estimate the volume of sediments contaminated by heavy metals and to characterize their spatial distribution, fundamental information for decision making of the remediation measures to be adopted and evaluation of the size and costs of these measures. To achieve this objective, seismic refraction tomography was used, which aims to determine the P-wave velocity model, which allows the determination of the depth of potentially contaminated sediments as a result of industrial activity, to estimate the volume of contaminated sediments.

The region under study corresponds to approximately 153.959 m^2 , with altitudes ranging from 505 to 509 meters in a not very irregular topography, whose coverage is essentially characterized by sediments and alluvial deposits, which were called alluvial plain, which was divided into three sectors, named by A, B and C.

Eight seismic refraction profiles were then undertaken, processed using the Wavepath Eikonal Traveltime (WET) tomography technique, incorporated in the Rayfract software of Intelligent Resources Inc. Seismic refraction is a method that allows the determination of subsurface structures by calculating the propagation velocities of seismic waves as a function of depth, by measuring the times of the first arrival of these waves. There are several methods of interpretation, from the classic ones (critical distance, intercept time, delay time, plus-minus, GRM etc.) to WET (Wavepath Eikonal Traveltime) tomog-

raphy. Seismic refraction tomography has proven to be a very powerful technique when applied to solve environmental problems.

For data collection a 48 channel ANTEO 1.0 (ANTEO CU) seismograph was used, powered by a 12V battery, cables with individual 24-bit digital converters (ANTEO AD6-x) connected to 50 Hz geophones. Model validation to the velocity values obtained in the seismic refraction tomography were made by stratigraphic analysis of the geological material extracted from an open trench next to one of the profiles (Profile 6).

The trench made in the sixth profile made it possible to identify the velocity corresponding to the level at which the subsurface characteristics show significant variations and should be associated with the top of the rocky substrate, which roughly corresponds to 600 m/s. It is found in all models that from about 600 m/s the velocity gradient increases, which allowed reinforcing the idea that this is the beginning of the rocky substrate. This velocity is reached at varying depths in each profile. The smallest depth at which it was reached is 2.5m in the first, fourth, fifth and sixth profiles and the largest depth is 4m in the eighth profile, being 3m the depth at which it was reached in the second and third. Although they were performed in different locations, the velocity models of the profiles 2, 3, 4, 5 and 6 have similar characteristics, with depths (where the reference speed is reached) varying between 2.5 and 3 meters. Which shows that the structure in sector A (at least up to the total depths reached) does not vary much from point to point. However, the seventh and eighth profiles in sector B show considerable differences, interpreted as resulting from the silting process in this region. But as it is a smaller sector compared to sector A it can be concluded that the information obtained from the profiles is sufficient to estimate the volume of sediments.

Volume estimation was made using Simpson's Rule 3/8, incorporated in Software Surfer 12. The total volume of sediments estimated to be involved in the need for remediation, whose value is $(228.5 \pm 26.8) \times 10^3 \text{ m}^3$.

Key-words: Seismic refraction, WET.

INTRODUÇÃO

O presente trabalho está focado na bacia sedimentar do córrego Consciência, junto a sua foz no rio São Francisco, na cidade de Três Marias, no Estado de Minas Gerais, Brasil. Estudos geoquímicos nesta região revelaram níveis críticos de contaminação em metais pesados resultantes de actividades industriais de metalurgia.

O objectivo geral do trabalho é o de estimar o volume de sedimentos contaminados por metais pesados e caracterizar a sua distribuição espacial, informação fundamental para a tomada de decisão das medidas de remediação

a adotar e avaliação da dimensão e dos custos dessas medidas. Para alcançar tal objectivo, recorreu-se à Tomografia de refração sísmica, cujo objectivo é determinar o modelo de velocidades das ondas P que permita determinar a profundidade dos sedimentos potencialmente contaminados como resultado da atividade industrial, para a estimativa do volume de sedimentos contaminados. A aplicação de métodos geofísicos para estudos ambientais é extensa (Reynolds, 1997; Powers & Burton, 2007; Elis et al., 2008; Fontoura et al., 2011).

ENQUADRAMENTO DA REGIÃO

LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA

O córrego Consciência é um afluente do rio São Francisco, localizado próximo à cidade de Três Marias, no Estado de Minas Gerais, no Brasil (Figura 1).

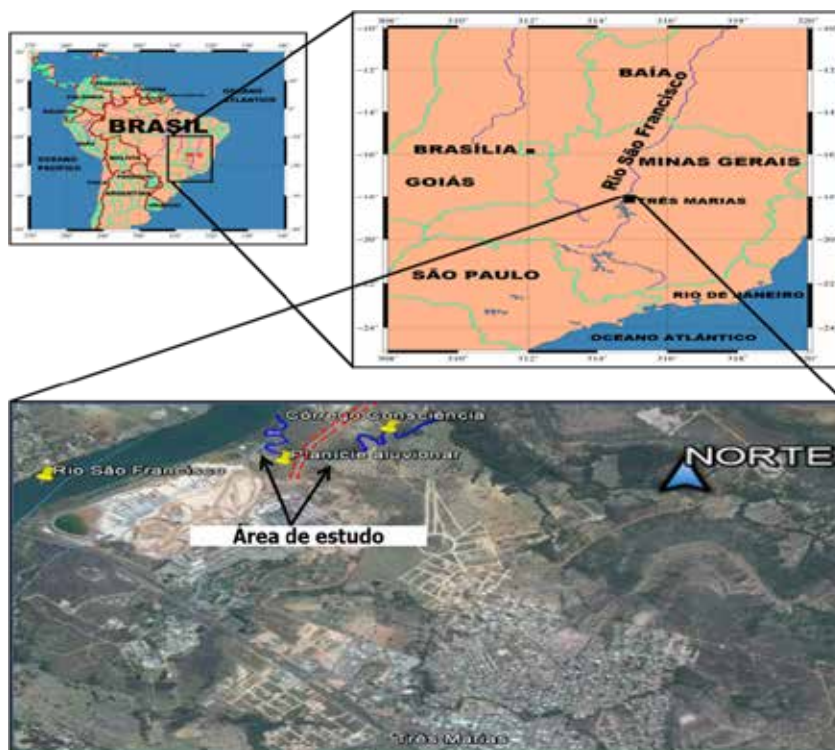


FIGURA 1. Localização do estado brasileiro de Minas Gerais, da cidade de Três Marias e do córrego Consciência.

TOPOGRAFIA E GEOQUÍMICA

A região em estudo corresponde aproximadamente a 153.959 m², com altitudes a variar de 505 a 509 metros numa topografia não muito irregular, cuja cobertura é caracterizada essencialmente por sedimentos e depósitos de aluviões, a que se chamou planície aluvionar. As linhas vermelhas e castanhas na Figura 2 encerram os sectores onde a campanha geofísica foi realizada (sectores A e B, respectivamente). O espaço entre os sectores A e B (no interior da linha amarela) chamou-se sector C.



FIGURA 2. Localização dos perfis sísmicos. As linhas azuis mais curtas são os perfis sísmicos. A linha azul maior localiza o córrego Consciência, e as linhas vermelha, castanha e amarela limitam os sectores A, B e C, respectivamente.

De acordo com o mapa geológico do Brasil à escala 1/100.000, Folha Três Marias (Soares, 2011), a geologia da região é dominada por uma sequência sedimentar de idade neoproterozoica, a Formação de Três Marias, que faz parte do Grupo Bambuí. Localmente, a Formação de Três Marias é constituída por arenitos finos quartzo-feldspáticos alternantes com pelitos e siltitos em bancadas decimétricas, sub-horizontais. Sobre esta formação ocorrem pontualmente depósitos aluvionares relacionados com a atual rede de drenagem (Araújo et al., 2013).

Foram realizadas campanhas de recolhas de amostras nas regiões localizadas nas bacias dos córregos Consciência e Barreiro Grande e no leito do córrego Consciência. Os resultados revelam concentrações críticas de metais, tais como Zinco, Cádmio, Chumbo, Cobre, Cobalto e Arsénio, especialmente na região planáltica da bacia do córrego Consciência e ao longo do seu leito (Fonseca, 2014).

REFERENCIAL TEÓRICO

Schuster & Quinus-Bosz (1993) propuseram o seguinte algoritmo de tomografia WET (**W**avepath **E**ikonal **T**raveltime):

- Picagem dos tempos das primeiras chegadas a partir dos sismogramas (tempos observados);
- Cálculo dos tempos teóricos por resolução da equação eikonal pelo método das diferenças finitas, usando um modelo inicial de velocidades (Qin et al., 1992);
- Minimização de uma função custo pelo método do gradiente descendente, resultando na fórmula de retroprojeto (Schuster & Quinus-Bosz, 1993, p. 1315 e 1317);
- Atualização do modelo inicial de velocidades e em seguida os passos anteriores são repetidos iterativamente até se atingir o critério de convergência (melhor ajuste entre os tempos teóricos e observados, isto é, minimização da diferença entre estes tempos). O melhor ajuste entre os tempos teóricos e os observados é aquele para o qual o RMS é menor.

Sabendo a localização da fonte sísmica, medindo o tempo de chegada da onda em cada receptor e considerando um modelo inicial de velocidades (*a priori*), a retroprojeção permite resolver a equação eikonal ao longo da trajetória dos raios sísmicos, isto é, obter os tempos de chegada de forma inversa (partindo dos receptores à fonte). Existem vários métodos de obtenção dos modelos iniciais, tais como o Método de Reciprocidade Generalizada (**Generalized Reciprocal Method-GRM**) (Palmer, 1981), o método Plus-Minus (Hagedoorn, 1959), o método de tempo de intercepção (Sheriff & Geldart, 1995) e o método Delta-V (Rohdewald, n.d.).

MATERIAIS E PROCESSO DE AQUISIÇÃO DOS DADOS

Para o alcance do objectivo geral, procedeu-se da seguinte forma:

- Seleção dos métodos e técnicas a usar;
- Realização da campanha de recolha de dados no Brasil (agosto e setembro de 2014);
- Processamento e análise dos dados;
- Estimativa do volume de sedimentos potencialmente contaminados;
- Interpretação de resultados.

A campanha de recolha de dados foi realizada nos meses de agosto e setembro de 2014. Para tal, usou-se um sismógrafo ANTEO 1.0 (ANTEO CU) de 48 canais, alimentado por uma bateria de 12V, cabos com conversores digitais de 24 bits individuais (ANTEO AD6-x) ligados a geofones de 50 Hz. O sinal é

digitalizado diretamente no geofone, minimizando, deste modo, a razão sinal/ruído. A fonte consistiu num martelo (marreta) de 7 kg, que embatia sobre uma placa metálica. Os geofones foram colocados em números iguais dum e doutro lado do sismógrafo, dispostos segundo um perfil linear (Figura 3).



FIGURA 3. Equipamento e esquema de um perfil sísmico. Esquerda: equipamento PASI e esquema de ligações para um conjunto de 48 geofones. Direita: exemplo de um dos perfis realizados na área em estudo.

Como referido anteriormente, identificaram-se três regiões no interior da planície, caracterizadas por depósitos aluvionares (sectores A, B e C da Figura 2), nas quais se realizaram oito perfis sísmicos. Os perfis foram distribuídos ao longo dos sectores de modo a obter resultados representativos, isto é, foram feitos de forma a obter informações quer dos limites da planície, quer do seu interior. A Tabela 1 apresenta em resumo informações sobre os perfis de tomografia de refração sísmica efetuados.

TABELA 1. Dados dos perfis sísmicos realizados.

Perfil	Orientação	Nº tiros	Espaçamento (m)	Pos. do 1º tiro em relação ao 1º geofone (m)	Nº geofones	Espaçamento (m)
1	E-W	17	1.5	-0.25	48	0.5
2	W-E	17	1.5	-0.25	48	0.5
3	NW-SE	16	1.5	-0.25	48	0.5
4	N-S	9	3	-0.25	48	0.5
5	S-N	17	1.5	-0.25	48	0.5
6	SE-NW	17	1.5	-0.25	48	0.5
7	W-E	17	1.5	-0.25	48	0.5
8	W-E	17	1.5	-0.25	48	0.5

PROCESSAMENTO

Depois da aquisição dos dados, passou-se ao processamento usando o *software* Rayfract, obedecendo os seguintes passos:

- a) Criação do projeto no Rayfract e importação dos dados;
- b) Picagem das primeiras chegadas;
- c) Geração do modelo inicial;
- d) Inversão.

A picagem das primeiras chegadas tem o objetivo de obter os tempos medidos (tempo de percurso da onda P refratada) para a criação dos gráficos tempo-distância. A Figura 4 mostra a secção sísmica com as picagens das primeiras chegadas do 8º tiro do 8º perfil e o correspondente gráfico tempo-distância.

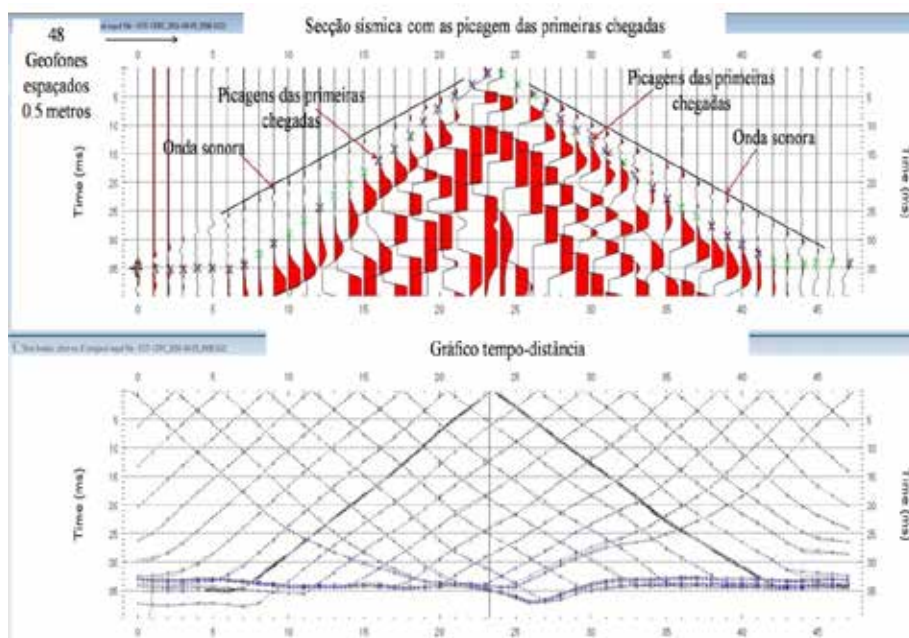


FIGURA 4. Secção sísmica e gráfico tempo-distância para o 8º tiro do 8º perfil. Secção sísmica com picagens (topo) e gráfico tempo-distância (baixo). A picagem dos tempos de chegada é representada por cruzes vermelhas. As cruzes azuis representam os tempos teóricos e as verdes, os pontos onde há coincidência entre os tempos medidos e os teóricos. No eixo horizontal estão representadas as posições dos geofones espaçados 0.5 metro e no eixo vertical estão os tempos em milissegundos. As duas retas pretas sobre a secção sísmica mostram o percurso da onda sonora.

Em seguida, o modelo inicial foi gerado pelo método XTV. O 1D-Gradient Smooth Initial Model é gerado a partir do Pseudo-deltaV.

A inversão foi feita com base no algoritmo de Schuster & Quinus-Bosz, baseado na fórmula de retroprojeção. Em quase todos os perfis a inversão terminou depois de 100 interações, com exceção do terceiro e sétimos perfis, nos quais foram necessárias 200 interações de modo a baixar o RMS.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

É possível identificar nos tomogramas uma zona de maior gradiente de velocidade. Esta variação deverá marcar o início de uma camada com características diferentes da inicial e isto serviu de referência na interpretação dos tomogramas.

Outro elemento de controlo usado na interpretação dos resultados obtidos foi o material geológico recolhido na sanja aberta junto ao ponto inicial do sexto perfil, cuja estratigrafia se encontra descrita na Figura 5. A estratigrafia da sanja revela alterações significativas na constituição dos materiais geológicos, correspondentes à transição entre os sedimentos e o soco alterado a partir da profundidade de 2.4 metros, o que corresponde a uma velocidade de cerca de 600 m/s (Figura 6).

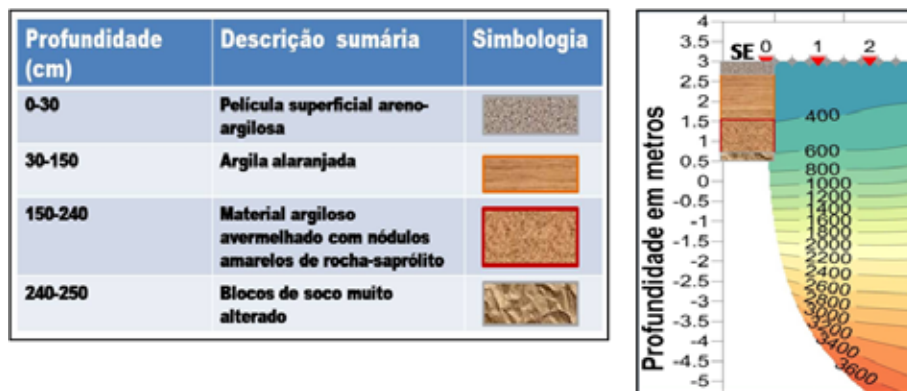


FIGURA 5. Comparação das velocidades das ondas P obtidas no perfil 6 com a estratigrafia da sanja. Os triângulos invertidos marcam os pontos de tiro e os pontos cinzentos marcam a posição dos geofones.

FONTE: Relatório de Progresso sobre a estratégia de Remediação dos Córregos Consciência e Barreiro Grande – 2ª Fase (Fonseca, 2014).

A profundidade de 0 m corresponde à cota de 505 m.

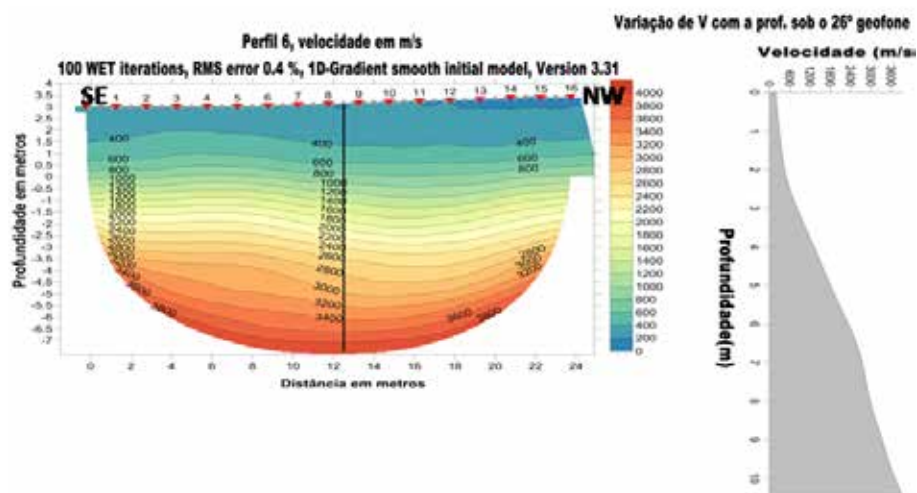


FIGURA 6. 6º Perfil sísmico. À esquerda, Tomograma com orientação SE-NW. Ao lado direito, variação da velocidade com a profundidade sob o 26º geofone.

A sanja feita no sexto perfil permitiu identificar a velocidade correspondente ao nível em que as características da subsuperfície apresentam variações significativas e deverá estar associada ao topo do substrato rochoso; tal velocidade corresponde, grosso modo, a 600 m/s. Verifica-se em todos os modelos que, a partir de cerca de 600 m/s, o gradiente de velocidade aumenta, o que permitiu reforçar a ideia de ser este o início do substrato rochoso. Esta velocidade é atingida a profundidades variáveis em cada perfil. A menor profundidade em que foi atingida é de 2.5m no primeiro, quarto, quinto e sexto perfis e a maior é de 4 m no oitavo perfil, sendo 3 m a profundidade em que se atingiu tal velocidade no segundo e terceiro perfis. Apesar de terem sido realizados em locais diferentes, os modelos de velocidade dos perfis 2, 3, 4, 5 e 6 apresentam características semelhantes, com profundidades (em que se alcança a velocidade de referência) a variar entre 2.5 e 3 metros, o que revela que a estrutura no sector A (pelo menos até as profundidades totais atingidas) não varia muito de ponto a ponto. Entretanto, o sétimo e o oitavo perfis no sector B apresentam diferenças consideráveis, interpretadas como resultantes do processo de assoreamento que se verifica nesta região. Mas, por ser um sector menor em relação a sector A, pode-se concluir que a informação obtida a partir dos perfis é suficiente para estimar o volume de sedimentos.

ESTIMATIVA DO VOLUME

Seja $i = 1, 2, 3, \dots, n$ o número de linhas e $j = 1, 2, 3, \dots, m$ o número de colunas da malha regular com espaçamento Δx entre colunas e Δy entre linhas, tal que $\Delta x = x(j+1) - x(j)$ e $\Delta y = y(i+1) - y(i)$. No Surfer 12 da Golden Software, o volume dado por meio da fórmula de 3/8 de Simpson é com base nas equações (Press et al., 1988; Chapra & Canale, 2008):

$$H(i) = \frac{3\Delta x}{8} [G_{i,1} + 3G_{i,2} + 3G_{i,3} + 2G_{i,4} + \dots + 2G_{i,m-1} + G_{i,m}] \quad \text{Eq. 1}$$

$$Volume = \frac{3\Delta y}{8} [H_1 + 3H_2 + 3H_3 + 2H_4 + \dots + 2H_{m-1} + H_m] \quad \text{Eq. 2}$$

Em que $G(i, j)$ é o valor da função na linha i e coluna j , ou seja, $G(i, j)$ é o valor da cota z no nodo (x, y) e os coeficientes seguem o padrão: $\{1, 3, 3, 2, 3, 3, 2, \dots, 3, 3, 2, 1\}$.

Foi desta forma que foram obtidos os volumes para cada sector, considerando-se os volumes por defeito e por excesso e, depois, a média aritmética entre estes dois últimos. O volume final considerado é igual ao valor médio com uma margem de erro igual ao erro relativo.

Em resumo:

TABELA 2. Volume de sedimentos estimado para cada sector

Volume (m ³)	Sector A	Sector B	Sector C
Por defeito	139x10 ³	45x10 ³	18x10 ³
Por excesso	172x10 ³	60x10 ³	23x10 ³
V médio	155.5x10 ³	52.5x10 ³	20.5x10 ³
Erro relativo	10.6%	14.3%	12.2%
Volume V	155.5x10 ³ ± 16.5x10 ³	52.5x10 ³ ± 7.5x10 ³	20.5x10 ³ ± 2.8x10 ³

Somando os volumes estimados em cada sector, obteve-se o volume total de sedimentos que se estima estarem envolvidos na necessidade de remediação, cujo valor é $(228.5 \pm 26.8) \times 10^3 \text{ m}^3$.

CONCLUSÕES GERAIS

A região em estudo é caracterizada por depósitos de aluviões e argilas, contaminados por metais pesados. Os principais contaminantes identificados

nas análises químicas foram Cádmio, Zinco, Arsénio, Cobre e Chumbo. A contaminação acontece de forma dispersa e, em certos casos, pontual, resultante da drenagem dominante na região. O sector B é caracterizado por um processo de assoreamento rápido, pelo que a profundidade dos sedimentos é maior que no sector A.

Era necessário considerar um nível de referência (profundidade de referência) e isso foi conseguido graças à análise estratigráfica do material geológico recolhido da sanja aberta junto ao sexto perfil, indicando como referência a profundidade em que se atinge a velocidade de 600 m/s, alcançada a profundidades diferentes, variando de 2.5 a 4 metros. Um facto identificado em todos os perfis é que a partir deste nível o gradiente de velocidade aumenta, o que ajudou a reforçar a ideia de ser este o início do soco alterado.

Embora a tomografia de refração sísmica não permitisse caracterizar a distribuição espacial da contaminação, seu emprego revelou-se útil à determinação do volume de sedimentos, calculado usando a regra de 3/8 de Simpson incorporada no *software* Surfer 12, cujo valor foi estimado em $(228.5 \pm 26.8) \times 10^3 \text{ m}^3$.

AGRADECIMENTOS

O autor Osorio de Cavacundo agradece o apoio recebido da GALP para participar do evento.

REFERÊNCIAS

- Araújo, A. A. V., Fonseca, R., Pinto, P., Fernandes, M. & Matos, J. (2013). Cartography of contaminants around a plant for the production of zinc (Três Marias, Minas Gerais, Brazil). In Moreira, N., Dias, R. & Araújo, A. (Eds.). *Geodinâmica e Tectónica global: a importância da Cartografia geológica*. 9ª Conferência Anual do GGET-SGP, Livro de Atas. (p. 71-74).
- Burton, B., Sheehan, J. & Rohdewald, S. (2010). Processing of Seismic Refraction Tomography Data. *Proceedings of Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*. Keystone, Colorado.
- Chapra, S. C., & Canale, R. P. (2011). *Métodos numéricos para engenharia*. McGraw-Hill Brasil.
- Elis, V. R., Mendonça, C. A., Porsani, J. L., & Strobino, E. D. F. (2008). O uso de sondagens dipolo-dipolo em estudos hidrogeológicos e de depósitos de resíduos. *Revista Brasileira de Geofísica*, 26(3), 317-325.
- Fonseca, R. M. F. (2014). *3º Relatório de Progresso sobre a estratégia de remediação dos Córregos Consciência e Barreiro Grande – 2ª Fase*. Évora.

Fontoura, M. J.; Moura, R. M. M. & Dias, A. G. (2011). A Geologia e a Geofísica na avaliação da contaminação associada a Vazadouros Controlados – o caso do VC de Matosinhos no Norte de Portugal. *Comunicações Geológicas*, 98, 83-92. Laboratório Nacional de Geologia e Energia IP.

Hagedoorn, J. G. (1959). The plus-minus method of interpreting seismic refraction sections. *Geophysical prospecting*, 7(2), 158-182.

Palmer, D. (1981). An Introduction to the Generalized Reciprocal Method of Seismic Refraction Interpretation. *Geophysics*, 46, 436-437.

Powers, M. H. & Burton, B. L. (2007). *Questa base line and pre-mining groundwater quality investigation*. 24. Seismic refraction tomography for volume analysis of saturated alluvium in the Straight Creek drainage and its confluence with Red River, Taos County, New Mexico: U.S. Geological Survey Scientific Investigation Report 2006-5166, 19 p.

Press, W. H., Flannery, B. P., Teukolsky, S. A. & Vetterling, W. T. (1988), *Numerical Recipes in C*. Cambridge University Press.

Qin, F., Lou, Y., Olsen, K., Cai, W. & Schuster, G. (1992). Finite-difference solution of the eikonal equation. *Geophysics*, 57, 478-487.

Reynolds, J. M. (1997). *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. Chichester: John Wiley and Sons Ltd.

Rohdewald, S. R. (n.d.). *The DeltatV 1D method for seismic refraction inversion*: Theory Intelligent Resources Inc. Suite 142, 757 West Hastings Street, B.C.

Schuster, G. T. & Quinuz-Bosz, A. (September 1993). Wavepath eikonal travelttime inversion: Theory. *Geophysics*, 58(9), 1314-1323, 5 figs.

Sheriff, R. E. & Geldart, L. P. (1995). *Exploration seismology*. Cambridge; New York: Cambridge University Press.

Soares, A. C. P. (Coord.). (2011). *Mapa geológico à escala 1/100.000*. Folha Três Marias – SE.23-Y-B-III. Governo do Estado de Minas Gerais, Secretaria de Estado de Desenvolvimento Econômico, CODEMIG – Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais, Ministério de Minas e Energia, Secretaria de Geologia Mineração e Transformação Mineral, CPRM – Serviço Geológico do Brasil.

AVALIAÇÃO DO RISCO DO RADÃO PRESENTE NA ÁGUA POTÁVEL DO MUNICÍPIO DA BIBALA

RADON RISK ASSESSMENT IN POTHABLE WATER OF THE BIBALA CITY

J. Kessongo¹

Y. Bahu²

L. Peralta³

S. Soares⁴

RESUMO

O principal objetivo do presente estudo consiste na medição da concentração de radão, ^{222}Rn , presente na água potável do município da Bibala. O ^{238}U é um dos isótopos do urânio que se encontra presente em alguns tipos de rocha, especialmente granitos. Sendo o ^{222}Rn um descendente da cadeia de desintegração do ^{238}U , quanto maior for a presença de urânio na estrutura geológica, maior será o potencial para produzir o gás radão. Em geral, este gás é o maior contribuinte para a poluição radioativa em águas subterrâneas. A concentração de radão na água representa um risco para a saúde pública devido ao facto de o gás poder escapar facilmente para o ar, aumentando a sua concentração total no interior de espaços fechados. Por outro lado, a ingestão de água com uma concentração de radão elevada representa um risco potencial para o desenvolvimento de cancro do estômago. Neste estudo, foram analisadas 26 amostras da água utilizada para consumo humano. A concentração de radão foi determinada utilizando o acessório RAD H2O, do equipamento RAD7 da DurrIDGE. Dos resultados obtidos, verificou-se que, em todas as amostras, os valores são superiores ao limite de 100 BqL^{-1} recomendado pela Organização Mundial de Saúde (OMS). E em 17 amostras os valores obtidos estão acima do limite de 11 BqL^{-1} , estabelecido pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (US-EPA).

Palavras-chave: Radão, Água, Bibala.

¹ Departamento de Física, Faculdade de Ciências da Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal; Laboratório de instrumentação e Física Experimental de Partículas, Lisboa, Portugal; Instituto Superior de Ciências da Educação da Huíla, Angola. Joaquim.kessongo@ubi.pt

² Departamento de Física, Faculdade de Ciências da Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal; Laboratório de instrumentação e Física Experimental de Partículas, Lisboa, Portugal. Instituto Superior Politécnico da Huíla da Universidade Mandume Ya Ndemufayo, Angola. yoenls.bahu@ubi.pt

³ Laboratório de instrumentação e Física Experimental de Partículas, Lisboa, Portugal; Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal. luis@lip.pt

⁴ Departamento de Física, Faculdade de Ciências da Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal; Centro de Matemática e aplicações da Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal; Laboratório de instrumentação e Física Experimental de Partículas, Lisboa, Portugal. shsoares@ubi.pt

EXTENDED ABSTRACT

Populations are subject to radiation from natural, terrestrial and cosmic origin and to radiation produced by artificial sources such as medical devices used in diagnosis or therapy. About 80% of environmental radiation is of natural origin, with radon being the main source of human exposure, contributing approximately 42% to the total radiation dose (Crick, 2014).

The ^{222}Rn isotope, commonly referred to as radon, is a radioactive gas resulting from the decay of the ^{226}Ra and is part of the ^{238}U decay series. This isotope is present in different concentrations in air, soil and water (Inácio, Soares & Almeida, 2017). The radon alpha emitting progeny ^{214}Po and ^{218}Po , being solid, attach themselves to atmospheric aerosols. These, if inhaled or ingested may decay inside the body, especially in the lungs and transfer their kinetic energy to cells causing various types of cell damage (Turner et al., 2011). For this reason, radon was classified as a carcinogen agent by the World Health Organization (WHO) in 1988, being the 2nd leading cause of lung cancer, second only to tobacco smoke (WHO, 2009). Radon released from rocks (emanation) and soil escapes to the surface due to the pressure difference between the air in the ground and the air in the atmosphere. Radon can dissolve in water and its presence has two main origins: the decay of ^{226}Ra contained in solution in water and through direct exhalation of radon from the decay of ^{226}Ra present in the solid aquifer structure (Jobbágy, Altitzoglou, Malo, Tanner, & Hult, 2017). The high concentration of dissolved radon in water is a health hazard due to the fact that the gas is easily released from the water during bathing, washing, flushing and other domestic activities, contributing to the increase of radon concentration in the air. On the other hand, ingestion of water containing high radon content poses an additional risk to stomach cancer (US-EPA, 2003).

The present study was conducted in Bibala municipality, located in the interior of Namibe province, extreme southwest of Angola. The municipality of Bibala has a surface area of 7.612 km² and about 55.400 inhabitants (Tchindongo, 2017). The climate in the Bibala region is semi-arid where the average annual temperature is around 23.7° C influenced by the cold stream of Benguela and by morphology where inselbergs are abundant reaching 2500 m height. Relative humidity varies between 40 and 70%.

The Bibala's region geological complex presents granitic rocks generally of porphyroid texture and coarse matrix, calcium-alkali rich feldspars, quartz and microcline with an enrichment in FeMg minerals and variable uranium concentration.

In this study 81 water samples were carefully collected from 27 holes of different depths and are identified by S1 to S27. In order to preserve the quality of the samples, the water was collected approximately after 2 minutes

of pumping and was immediately sealed in 40 mL glass vials to avoid minimal radon leakage. The samples were then transported by air to the Laboratório de Estudos dos efeitos do Radão (LabExpoRad) located at the University of Beira Interior, Covilhã, Portugal.

To determine the radon concentration in the water samples, the RAD7 equipment, a radon monitor manufactured by the American company Durrige, was used. RAD7 is an instrument based on a solid state detector capable of measuring, in real time, the concentration of radon in water, air and soil (Grodzins, 2009). In this case the RAD7 H2O technique that uses specific protocols that provide a direct reading of radon concentration in water samples was used. When a ^{222}Rn radon nucleus disintegrates within the RAD7 cell, its ^{218}Po and ^{214}Po descendants, acquire a positive charge upon interaction with air from the cell, and are collected by the detector's active surface placed at a negative electric potential relative to ground (Malakootian & Nejhad, 2017).

From the measurements it was found that, all samples, the radon concentration values were below the recommended limit of 100 BqL^{-1} by the World Health Organization (WHO) and 17 samples present values above the limit of 11 BqL^{-1} established by the United States Environmental Protection Agency (US-EPA, 2003) was exceeded. The highest radon concentration value found was $41.71 \pm 5.04 \text{ Bq.l}^{-1}$ from a sample collected at a water hole in Kipamba, while the lowest value, $5.29 \pm 0.64 \text{ Bq.l}^{-1}$, was obtained for a sample collected at Caminho de Ferro. In general the measured values are within the limits recommended by WHO and in general the measured radon concentration values do not reveal the need for an immediate preventive action. As this is the first work related to the measurement of radon concentration in water in Angola, the results obtained constitute a guiding starting point for further radon measurements throughout Bibala municipality and in the future, throughout Angola.

Key-words: Radon, Water, Bibala.

INTRODUÇÃO

Diariamente as populações estão sujeitas a fontes naturais de radiação, de origem terrestre ou cósmica, bem como a fontes artificiais, como é o caso de dispositivos médicos utilizados em diagnóstico ou terapia, ou ainda de dispositivos usados na indústria e na investigação. No entanto, cerca de 80% da radiação ambiente é de origem natural, sendo o radão a maior fonte de exposição humana, contribuindo com aproximadamente 42% para a dose total de radiação (Crick, 2014).

O isótopo ^{222}Rn , designado vulgarmente por radão, é um gás radioativo resultante da série de decaimento do urânio ^{238}U , presente, em diferentes con-

centrações, no ar, no solo e na água (Inácio, Soares & Almeida, 2017). Os descendentes do radão de meia-vida inferior a 30 minutos e emissores de partículas alfa (^{214}Po e ^{218}Po), por serem sólidos, fixam-se nos aerossóis atmosféricos e podem constituir um risco para a saúde. Se forem inalados ou ingeridos, ao decaírem no interior do organismo, sobretudo nos pulmões, transferem a sua energia cinética para as células, provocando diversos tipos de danos celulares (Turner et al., 2011). Por esta razão, em 1988 o radão foi classificado como agente cancerígeno pela Organização Mundial da Saúde (OMS), sendo apontado como a segunda causa de morte por cancro do pulmão, ficando apenas atrás do fumo de tabaco (WHO, 2009).

O radão, quando é libertado das rochas (emanação) e do solo (exalação), escapa para a superfície devido à diferença de pressão entre o ar no solo e o ar à superfície exterior (Figura 1), mas pode, também, ser encontrado em águas subterrâneas. O radão dissolvido na água tem duas origens principais, uma devido ao decaimento do rádio, ^{226}Ra , contido em solução na água, e outra pela exalação direta do radão proveniente do decaimento do ^{226}Ra presente na estrutura sólida do aquífero (Jobbágy, Altzitzoglou, Malo, Tanner & Hult, 2017).

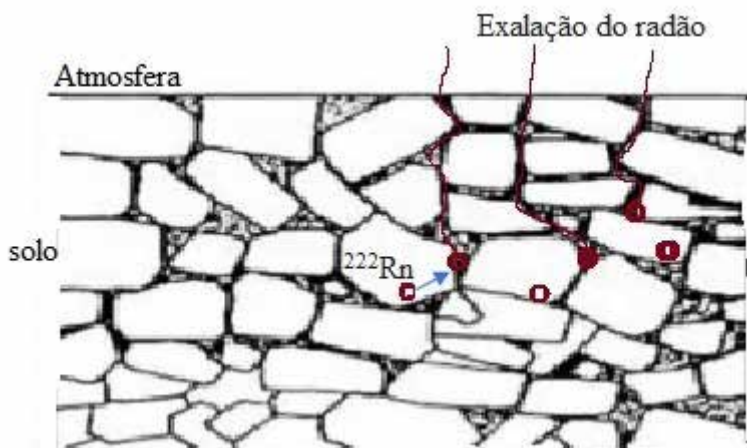


FIGURA 1. Processo de emanação, transporte e exalação do radão.

A elevada concentração de radão dissolvido na água pode constituir um risco para a saúde, principalmente devido ao facto de este gás se libertar facilmente da água, por exemplo, em várias atividades domésticas, contribuindo para o aumento da sua concentração no interior da habitação. Por outro lado, a ingestão de água contendo elevado teor de radão constitui um risco adicional para o aparecimento de cancro do estômago (US-EPA, 2003).

LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O presente estudo foi realizado no município da Bibala, situado no interior da província do Namibe, extremo sudoeste de Angola (Figura 2). O município da Bibala possui uma superfície de 7.612 km² e cerca de 55 mil habitantes (Tchindongo, 2017).

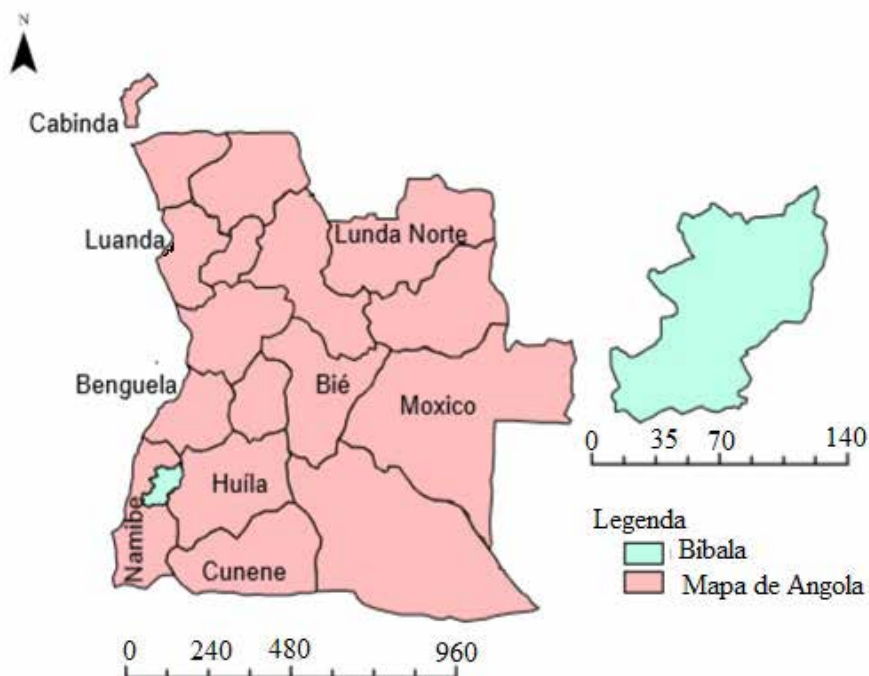


FIGURA 2. Mapa da localização do município da Bibala, em Angola.

O clima da região da Bibala é semiárido e a temperatura média anual de 23,7°C é influenciada pela corrente de Benguela e pelo relevo, onde se destacam *inselbergs* (“monte ilha”), que atingem cotas de até 2.500 m. A humidade relativa varia entre os 40% e os 70% (Fernandes, 2014).

GEOLOGIA

As litologias graníticas em Angola exibem frequentemente intensa foliação e distribuem-se por todas as regiões, em especial no noroeste (NBanza Congo), centro-oeste, nordeste (Lundas) e su-sudoeste, que abrange as províncias da Huíla, Namibe e Cunene (Ferreira & Silva, 2005). Os complexos graníticos da região da Bibala, província do Namibe, são, em geral, de textura

porfiroide e matriz grosseira e distribuem-se pelas áreas entre Moçamedes, Caraculo, Munhino e Luchipa. As rochas graníticas da Bibala são ainda descritas como sendo cálcio-alcalinas, ricas em quartzo, microclínio e apresentam enriquecimento em minerais ferromagnesianos, bem como em teores de urânio (Implicações, 1984).

RECOLHA DAS AMOSTRAS

Neste estudo, foram analisadas 81 amostras de água retiradas cuidadosamente em 27 furos de diferentes profundidades. Estas amostras foram identificadas com os códigos S1 a S27. Para melhor identificação dos locais onde a água consumida apresenta valores mais elevados de radão, são apresentadas na Tabela 1 as coordenadas GPS dos locais de recolha das amostras.

TABELA 1. Coordenadas GPS dos pontos de recolha.

ID	Locais de recolha	Latitude	Longitude
S1	Kipamba	-14.747778	13.375556
S2	Mahita	-14.770833	13.346111
S3	Bomba	-14.747500	13.356667
S4	Matadouro	-14.747222	13.358333
S5	Matuco	-14.757222	13.353056
S6	Jamba	-14.851389	13.168889
S7	Camupupa	-14.731389	13.451667
S8	Rio da areia	-14.635278	13.390556
S9	Montipa	-14.649167	13.259722
S10	Residence 1	-14.759167	13.349722
S11	Residence 2	-14.760150	13.351490
S12	Residence 3	-14.746890	13.353420
S13	Residence 4	-14.748180	13.313120
S14	Mukwahona	-14.794722	13.346667
S15	Humbia	-14.764722	13.404722
S16	Navindombo	-14.803889	13.340000
S17	Muhonda	-14.876111	13.122500
S18	Caitou	-14.482500	13.082222
S19	Posto médico	-14.480833	13.076667
S20	Kapangombe	-14.722500	13.443889
S21	Caminho de Ferro	-14.751667	13.371944
S22	Casas novas	-14.728056	13.352778
S23	Miquete	-14.724167	13.439167
S24	Escolan° 2004	-14.866944	13.100833
S25	Lola	-14.304444	13.990000
S25	Igreja protestante	-14.521389	13.125556
S27	Sonda	-14.863611	13.110278

Com o objetivo de preservar a qualidade das amostras, a água foi recolhida depois de aproximadamente 2 minutos de bombagem (Figura 3a) e foi imediatamente selada em frascos especiais de 40 ml para evitar a mínima fuga do radão (Figura 3b). Estes frascos especiais garantem que a perda do radão por vazamento seja a mínima possível. As amostras foram em seguida transportadas, por meio aéreo, para o Laboratório de Estudos dos Efeitos da Exposição ao Radão (LabExpoRad), localizado na Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal.



a)
b)

FIGURA 3. a) Recolha de uma amostra num poço;
b) frascos especiais para a recolha e transporte de amostras de água.

MEDIÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE RADÃO

Para se determinar a concentração de radão nas amostras de água, foi utilizado o equipamento RAD7, um monitor de radão fabricado pela companhia americana Durrige. O RAD7 é um instrumento baseado num detetor de estado sólido capaz de medir, em tempo real, a concentração do radão na água, no ar e no solo (Grodzins, 2009).

A técnica de medição do RAD7 H₂O utiliza protocolos específicos que providenciam uma leitura direta da concentração de radão em amostras de água. O RAD7 utiliza o silício como material semiconductor que converte a radiação alfa num sinal elétrico. O detetor existente no interior do RAD7 é

capaz de distinguir as partículas alfa libertadas no decaimento dos dois descendentes do radão, os isótopos ^{218}Po e ^{214}Po , cujas energias são 6 e 7,9 MeV, respetivamente (Kandari, Aswal, Prasad, Bourai & Ramola, 2016).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos para a concentração de radão na água são apresentados no gráfico da Figura 4. Verificou-se que, em todas as amostras, os valores estavam abaixo do limite de 100 BqL^{-1} , recomendado pela Organização Mundial de Saúde (OMS), e em 17 amostras foi ultrapassado o limite de 11 BqL^{-1} , estabelecido pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (US-EPA, 2003). O valor mais elevado foi obtido na amostra recolhida no furo de água da localidade da Kipamba (amostra S1), correspondendo a uma concentração de radão de $41,71 \pm 5,04 \text{ BqL}^{-1}$, enquanto o valor mais baixo, de $5,29 \pm 0,64 \text{ BqL}^{-1}$, foi obtido para a amostra do Caminho de ferro (amostra S21).

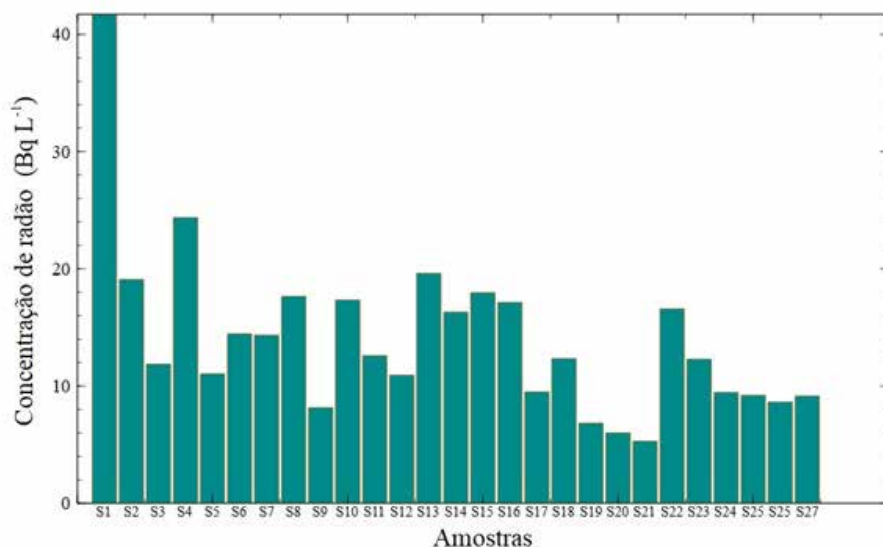


FIGURA 4. Concentração de radão nas amostras recolhidas em 2017 e 2018.

CONCLUSÃO

Na região sul de Angola, rica em rochas graníticas, têm sido encontrados minerais radioativos de interesse radiológico. O município da Bibala, situado na província do Namibe, é caracterizado por uma estrutura geológica

granítica contendo urânio, ^{238}U , que apresenta na sua cadeia de decaimento o radão, ^{222}Rn . Este gás radioativo incolor, insípido e inodoro pode ser encontrado dissolvido na água subterrânea e constituir um risco para a saúde quando essa água é utilizada para consumo humano. Em Angola, tanto quanto se sabe, não existem estudos de avaliação da concentração de radão na água consumida pela população da Bibala e esta foi a principal motivação para a realização deste estudo.

Uma vez que em Angola não existe legislação relacionada com medidas preventivas em relação à concentração de radão na água para consumo humano, os valores obtidos neste estudo foram comparados com os limites recomendados pela Organização Mundial de Saúde (OMS). Na sua generalidade, os valores medidos estão dentro dos limites recomendados pela OMS, embora 17 das amostras analisadas apresentassem valores superiores a 11 BqL^{-1} , o limite estabelecido pela US-EPA. Nesta primeira avaliação, os valores da concentração de radão medidos não revelam a necessidade para uma ação imediata de prevenção.

Os resultados obtidos neste trabalho preliminar constituem um ponto de partida orientador para as posteriores medições de radão que estão a ser programadas para toda a extensão do município da Bibala e, futuramente, em todo o país.

AGRADECIMENTOS

O autor Joaquim Kessongo agradece o apoio recebido da GALP para participar do evento.

REFERÊNCIAS

- Crick, M. (2014). *Levels and effects of exposure to ionizing radiation*. Content • Background to UNSCEAR • Scientific findings – Levels of exposure – Effects of exposure • Chernobyl accident • Fukushima-Daiichi accident, (June).
- Fernandes, J. B. C. (2014). As pinturas do abrigo do Tchitundu-Hulu. *Mucaí, I*, 132.
- Ferreira, A., & Silva, D. A. (2005). *A geologia da República de Angola desde o paleoarcaico ao paleozoico inferior*. Departamento de Geologia do Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação (INETI), Estrada da Portela-Zambujal, Apartado 7586, 2720 Alfragide (Lisboa), Portugal.
- Grodzins, L. (2009). *RAD7 Radon Detector*, (781), 1-74.
- Implicações, E. S. (1984). Idades do magmatismo granítico da região de Caraculo e Bibala (SW de Angola) e suas implicações na correlação geológica com o Cinturão Ribeira no Sudeste do Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*, 22(1) (2017), 73-81.

- Inácio, M., Soares, S., & Almeida, P. (2017). Radon concentration assessment in water sources of public drinking of Covilhã's county, Portugal. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 10(2), 135-139. <https://doi.org/10.1097/00001622-199709050-00006>
- Jobbágy, V., Altitzoglou, T., Malo, P., Tanner, V., & Hult, M. (2017). A brief overview on radon measurements in drinking water. *Journal of Environmental Radioactivity*, 173, 18-24. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2016.09.019>
- Kandari, T., Aswal, S., Prasad, M., Bourai, A. A., & Ramola, R. C. (2016). Estimation of annual effective dose from radon concentration along Main Boundary Thrust (MBT) in Garhwal Himalaya. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*. <https://doi.org/10.1016/j.jrras.2015.10.005>
- Malakootian, M., & Nejhad, Y. S. (2017). Determination of radon concentration in drinking water of Bam villages and evaluation of the annual effective dose. *International Journal of Radiation Research*, 15(1), 2017. <https://doi.org/10.18869/acadpub.ijrr.15.1.81>
- Tchindongo, A. (2017). *Estudo de Linha de Base do Sector Económico e Produtivo do Município da Bibala, Governo de Angola*.
- Turner, M. C., Krewski, D., Chen, Y., Pope, C. A., Gapstur, S., & Thun, M. J. (2011). Radon and lung cancer in the American Cancer Society Cohort. *Cancer Epidemiology Biomarkers and Prevention*, 20(3), 438-448. <https://doi.org/10.1158/1055-9965.EPI-10-1153>
- US-EPA. (2003). EPA Assessment of Risks from Radon in Homes. *Office of Radiation and Indoor Air*, (June), 88.
- WHO. (2009). *Who Handbook on Indoor Radon: A Public Health Perspective*. World Health Organization. 110 p. <https://doi.org/10.1080/00207230903556771>

ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS EM ANGOLA: UMA ABORDAGEM EM SALA DE AULA

CLIMATE CHANGE IN ANGOLA: A CLASSROOM APPROACH

G. J. Prego¹
T. M. Seixas²
M. A. Salgueiro da Silva³

RESUMO

Devido às alterações climáticas, estima-se que, até 2020, cerca de 75 a 250 milhões de seres humanos viverão em regiões de *stress* hídrico, que juntamente com uma maior procura de água, porá em causa os seus meios de subsistência. Neste contexto, o continente africano é um dos mais vulneráveis a estas alterações, dada a baixa capacidade adaptativa e de resiliência da maioria da população. A educação ambiental das diferentes faixas etárias pode constituir um recurso e uma estratégia de combate às alterações climáticas, preparando as crianças e os jovens como meios catalisadores de uma sociedade capaz de usar de forma racional e sustentável os recursos limitados do planeta. Este estudo teve como objetivo a realização de um inquérito sobre os conhecimentos gerais que diferentes amostras da população estudantil, em diversas regiões de Angola, têm sobre as alterações climáticas. Analisou-se, ainda, a sua conscientização sobre a problemática das alterações climáticas e a formulação de propostas de mitigação destes efeitos, a serem implementadas em níveis regional e nacional. A formulação deste inquérito é baseada no artigo subordinado ao tema “Mudança Climática na Sala de Aula”, do curso da UNESCO para professores do ensino secundário sobre Educação em Mudanças Climáticas e Desenvolvimento Sustentável (EMCDS). Observam-se deficiências na cultura geral científica, que é de todo necessário mitigar por meio da inclusão da problemática das alterações climáticas nos programas escolares em Angola e pelo reforço dos recursos necessários à sua implementação. Regista-se, também, um déficit de informação e da consequente conscientização sobre os efeitos globais das alterações climáticas.

Palavras-chave: alterações climáticas, educação, Angola, UNESCO.

EXTENDED ABSTRACT

Climate change represents one of the biggest challenges facing planet Earth in the 21st century and should be recognized as a global issue of ex-

¹ Departamento de Física e Astronomia da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, Portugal; Universidade Katyavala Bwila, Benguela, Angola. guidoprego@hotmail.com

² Departamento de Física e Astronomia da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto; Centro de Investigação da Terra e do Espaço da Universidade de Coimbra, Portugal. tmseixas@fc.up.pt

³ Departamento de Física e Astronomia da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, Centro de Investigação da Terra e do Espaço da Universidade de Coimbra, Portugal, massilva@fc.up.pt

treme concern (Hazo et al., 2019; Pachauri et al., 2014; Adebayo et al., 2013). Despite some, albeit few, skeptical views (Frank et al., 2008; Washington et al., 2011), there is widespread consensus among members of government, research, and civil society institutions (Pachauri et al., 2014; UNDP, 2009; Stern, 2008a, 2008b; Mings, 2008; Parry et al., 2007) that climate change is real as well as its impacts, constituting one of the greatest environmental threats to sustainable development. Indeed, the effects of climate change on biodiversity, agriculture, water resources and human health are already notorious, although to varying degrees depending on the region of the world (McCarthy et al., 2001). Studies show that Africa is one of the continents most vulnerable to climate change due in part to its low adaptive and resilience and also to constant armed conflict (UNESCO 2014 CC BY-NC-AS, 2014).

Education is critical for achieving environmental and ethical awareness, values and attitudes, skills and behaviors consistent with sustainable development and also for effective public participation in decision making (UNESCO, 2014; UNESCO, 1992). According to UNESCO, sustainable development is a culturally directed search for a dynamic balance in the relations between social, economic and cultural systems, a balance that seeks to promote social equity (UNESCO-UNEVOC, 2004). Education for sustainable development is being considered as the main component of implementing sustainable development. In particular, training in technical and vocational education for entrepreneurs has been identified as a vehicle for the implementation of education for sustainable development.

The 2007 Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) report reflected the emerging global consensus among scientists that climate change is predominantly human-induced (IPCC, 2007). This report signaled the need for urgent and transformative local and global action to address the threat of potentially uncontrolled climate change. Since then, our understanding of this threat has become much clearer, and there has been concern in the scientific community whether the global community will be able to act quickly and decisively enough to stabilize the global surface temperature increase by 2.00 °C above pre-industrial levels, which is generally considered to be a habitable increase (Oxfam International, 2009).

In this difficult task, education has a crucial role to play. Its role is triple. First, education must play a role in building social and individual capacities and attitudes for climate change mitigation to anticipate the worst climate change scenarios in the future. Second, education must contribute to the development of adaptive capacities and attitudes to climate change already evident and imminent. Third, education has to play an ongoing role in stimulating and strengthening understanding and close monitoring in the face of the reality of climate change.

In 2010, UNESCO established the Education for Sustainable Development Program (CCESD) (UNESCO, 2010), recognizing the crucial part that education and awareness must play in reversing the threat that climate change poses to a sustainable future. The priorities of the CCESD program are: (1) strengthen countries' capacity to provide quality climate change education for sustainable development in secondary education; (2) encourage and improve innovative teaching approaches that integrate quality climate change education for sustainable development; (3) raise climate change awareness and improve non-formal education programs through the media, networks and partnerships (UNESCO, 2010, p. 5).

According to the UNESCO Strategy for the Second Half of the United Nations Decade of Education for Sustainable Development, 2010, climate change is not just environmental, in terms of the root cause (economic development, industrialization, urbanization, consumption patterns and lifestyle, etc.), neither in terms of their actual and anticipated effects (increasing scarcity of resources, etc.), nor in terms of the means by which they can be mitigated and adapted (international conventions on carbon dioxide emissions, national ecological taxes, awareness programs, etc.). That's why UNESCO promotes Education for Sustainable Development as the best way to address climate change through education. Environmental education at different ages can be a resource and strategy for combating climate change, preparing children and youth as catalysts for a society capable of rationally and sustainably using the limited resources of the planet.

This study aimed to conduct a survey on the general knowledge that different samples of the student population in various regions of Angola have on climate change. It was also analyzed their awareness on the problem of climate change, and the formulation of proposals to mitigate these effects, to be implemented at regional and national level. The formulation of this survey is based on the article on Climate Change in the Classroom of the UNESCO course for secondary school teachers on climate change education and sustainable development (EMCDS).

For the surveys, secondary education institutions from southwest Angola were selected, as it is one of the Angolan regions where some signs of the effects of climate change are already evident. In Benguela province, for example, there is a progressive expansion of the Namib desert. The survey was conducted in the classroom environment of the participating institutions, requiring students to fill in personal information and answer their paper questionnaires.

The answers were collected in an Excel document for further processing and analysis. The number of YES answers was calculated for each question. These values were converted to a percentage of the total number of students from each institution / course participating in the survey. It is thus possible to

analyse differences in responses between different institutions / courses. The weighted average for all participating institutions / courses, the corresponding standard deviation, and the difference between the objective value and the mean value, DOM = Objective-Average, were calculated. For each question, the objective value (100 or 0) corresponds to a population fully aware and knowledgeable of climate change, its consequences and the measures necessary to mitigate its effects. High absolute values of the DOM difference indicate a lack of knowledge and / or awareness on climate change issues.

Based on the results obtained, the following conclusions can be drawn:

a) The answers to the YES / NO questionnaire show a reasonable uniformity in the degree of knowledge and awareness of climate change issues in the student samples of the 11 institutions / courses participating in the survey. This can be inferred from the relatively low values of the corresponding standard deviations.

b) Although eight of the questions have relatively low values of the DOM parameter (minimum: 1%; maximum: 22%), they nevertheless indicate that there are deficiencies in the general scientific culture that must be mitigated by including the issue of climate change in school programs in Angola.

c) Significantly high values (minimum: -30%; maximum: 64%) are observed in the DOM parameter for questions 9-17. Since these questions address intrinsic aspects of the global character of climate change, high DOM values are indicative of information deficits and consequent awareness of the global effects of climate change.

Although this study is still at a preliminary stage, we can conclude that there is a lack of knowledge and awareness about the problem of climate change in the analyzed Angola student sample, which may be corrected by the reformulation of Angola's school programs and the strengthening of resources needed for its implementation.

Key-words: climate changes, education, Angola, UNESCO.

INTRODUÇÃO

As alterações climáticas representam um dos maiores desafios que o planeta Terra enfrenta no século XXI, devendo ser reconhecidas como uma questão global de extrema preocupação (Hazo et al., 2019, Pachauri & Meyer, 2014, Adebayo & Oruonye, 2013). Apesar de algumas, embora poucas, opiniões cétricas (Frank, 2008, Washington & Cook, 2011), existe um consenso generalizado entre os membros das instituições governamentais, de investigação e da sociedade civil (Pachauri & Meyer, 2014; UNDP, 2009; Stern, 2008a, 2008b; Mings, 2008, Parry et al., 2007) de que as alterações climáticas são reais, bem como os seus impactos, constituindo uma das maiores ameaças

ambientais ao desenvolvimento sustentável. De facto, são já notórios os efeitos das alterações climáticas na biodiversidade, na agricultura, nos recursos hídricos e na saúde humana, embora com diferentes magnitudes, consoante a região do mundo (McCarthy & White, 2001). Estudos mostram que África é um dos continentes mais vulneráveis face às alterações climáticas devido, em parte, à sua baixa capacidade adaptativa e de resiliência e, também, aos constantes conflitos armados (UNESCO 2014 CC BY-NC-AS, 2014).

EDUCAÇÃO PARA UM DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

A educação é fundamental para alcançar consciência ambiental e ética, valores e atitudes, capacidades e comportamentos consistentes com o desenvolvimento sustentável e também para uma participação pública efetiva na tomada de decisões (UNESCO, 2014; UNESCO, 1992). Segundo a UNESCO, o desenvolvimento sustentável é uma busca culturalmente direcionada para um equilíbrio dinâmico nas relações entre sistemas sociais, económicos e culturais, um equilíbrio que busca promover a equidade social (UNESCO-UNEVOC, 2004). A educação para o desenvolvimento sustentável (EDS) está a ser considerada como a componente principal da implementação do desenvolvimento sustentável. Em particular, a formação em educação técnica e profissional para empreendedores foi identificada como um veículo para a implementação da educação para o desenvolvimento sustentável.

Dado que o desenvolvimento sustentável é um dos desafios emergentes do século XXI, a Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (UNESCO) estabeleceu que os programas de Educação e Preparação Técnica e Vocacional devem desempenhar um papel central no desenvolvimento da nova geração de indivíduos que enfrentarão o desafio de alcançar o desenvolvimento socioeconómico sustentável em todo o mundo (UNESCO, 1999).

POR QUE UMA EDUCAÇÃO SOBRE ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS?

O relatório 2007 do Painel Intergovernamental sobre Alterações Climáticas (UN Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC) refletiu o consenso global emergente entre os cientistas de que as alterações climáticas são predominantemente induzidas pelo homem (IPCC, 2007). Este relatório sinalizou a necessidade de ações urgentes e transformadoras, locais e globais, para enfrentar a ameaça das alterações climáticas, potencialmente, descontroladas. Desde então, nossa compreensão sobre esta ameaça tornou-se muito mais clara, havendo a preocupação na comunidade científica em saber se a

comunidade global será capaz de agir de forma célere e decisiva o suficiente para estabilizar o aumento da temperatura da superfície global em 2,00°C acima dos níveis pré-industriais, o que, geralmente, é considerado como sendo um aumento habitável (Oxfam International, 2009).

Nesta tarefa difícil, a educação tem um papel crucial a desempenhar. O seu papel é triplo (Figura 1). Primeiro, a educação tem que desempenhar um papel na construção de capacidades e atitudes sociais e individuais para **mitigação** das **alterações climáticas**, de modo a antecipar os piores cenários de alterações climáticas no futuro. Segundo, a educação tem que contribuir para o desenvolvimento de capacidades e atitudes de **adaptação** face às alterações climáticas já evidentes e iminentes. Terceiro, a educação tem que desempenhar um papel contínuo na estimulação e no reforço da **compreensão** e da **monitorização atenta**, face à realidade das alterações climáticas.

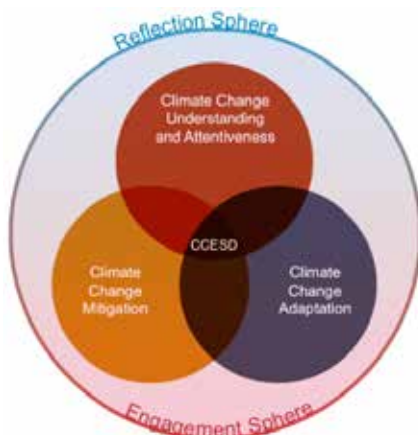


FIGURA 1. O papel da educação no cenário de alterações climáticas.
FONTE: UNESCO (2014).

POR QUE INTEGRAR O TEMA DAS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS NA EDUCAÇÃO PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL?

Em 2010, a UNESCO estabeleceu o Programa de Educação para o Desenvolvimento Sustentável (CCESD) (UNESCO, 2013), reconhecendo a parte crucial que a educação e a conscientização devem desempenhar para reverterem a ameaça que as alterações climáticas representam a um futuro sustentável. As prioridades do programa CCESD são:

1. Fortalecer a capacidade de os países oferecerem educação de qualidade sobre alterações climáticas para o desenvolvimento sustentável no ensino secundário;

2. Incentivar e melhorar abordagens de ensino inovadoras que integrem educação de qualidade sobre alterações climáticas para o desenvolvimento sustentável;
3. Aumentar a conscientização sobre as alterações climáticas e melhorar os programas de educação não formal por meio dos *media*, redes e parcerias (UNESCO, 2013, p. 5).

Segundo a *UNESCO Strategy for the Second Half of the United Nations Decade of Education for Sustainable Development, 2010*,

(...) as alterações climáticas não são apenas ambientais, em termos de causa principal (desenvolvimento económico, industrialização, urbanização, padrões de consumo e estilo de vida, etc.), nem em termos dos seus efeitos reais e previstos (escassez crescente de recursos, etc.), nem em termos dos meios pelos quais as mesmas podem ser mitigadas e adaptadas (convenções internacionais sobre emissões de dióxido de carbono, impostos ecológicos nacionais, programas de conscientização, etc.).

É por isso que a UNESCO promove a Educação para o Desenvolvimento Sustentável como a melhor forma de abordar as alterações climáticas por meio da educação.

POR QUE A APRENDIZAGEM SOBRE ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS PRECISA DE UMA DIMENSÃO LOCAL?

As experiências reais e práticas melhoram a aprendizagem dos intervenientes, sendo um motivo suficiente para a inclusão local do ensino sobre alterações climáticas para o desenvolvimento sustentável. Mas há ainda outros argumentos a ter em consideração. Primeiro, fomentar o apego ao local por meio de programas de ensino/aprendizagem pode promover uma sensação de propriedade e história (Lopez, 1998), importante na promoção de uma resposta ética às alterações climáticas. Por exemplo (UNESCO 2014 CC BY-NC-AS, 2014),

o desenvolvimento do conhecimento das práticas culturais e agrícolas locais, baseadas na estação do ano ou da flora e fauna locais e como elas contribuíram para a história e o simbolismo culturais e religiosos, bem como a exploração adicional de como elas podem ser perdidas em consequência das alterações climáticas, podem criar raízes a sentimentos de responsabilidade e ação no cenário local.

Segundo, a localidade e a comunidade local fornecem contextos concretos da vida real para explorar e experimentar estilos de vida alternativos, economias e formas de organização social em resposta às alterações climáticas. Ao levar a aprendizagem de sustentabilidade da sala de aula para a comunidade, os estudantes podem trabalhar ao lado dos membros da comunidade para pensar e implementar iniciativas locais com vistas à mitigação das alterações climáticas, da adaptação e da redução de riscos de desastres.

POR QUE UMA DIMENSÃO GLOBAL TAMBÉM É ESSENCIAL?

As decisões locais têm implicações globais. As alterações climáticas não param nas fronteiras nacionais. As decisões e comportamentos relacionados com estilo de vida numa parte do mundo podem ter sérias implicações para outras partes do mundo. Por este motivo, a educação sobre as alterações climáticas para um desenvolvimento sustentável inclui uma forte dimensão global. Por exemplo, os estudantes de todos os locais precisam:

- saber o que outras sociedades estão a fazer (ou não), no que concerne ao aquecimento do planeta;
- entender as razões económicas, sociais e políticas globais que impulsionam o problema;
- conhecer histórias inspiradoras de ações bem-sucedidas de grupos e comunidades para mitigar ou se adaptarem às alterações climáticas;
- saber o que os outros jovens estão a pensar e a fazer, nomeadamente, em termos de currículos, materiais de ensino e aprendizagem (Lotz-Sisitka, 2010).

As muitas vozes e experiências de pessoas de todo o mundo precisam ser ouvidas na sala de aula e isso consegue-se por intermédio dos *media* e das redes sociais.

INQUÉRITO SOBRE AS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS EM ANGOLA

O continente africano é um dos mais vulneráveis às alterações climáticas, dada a baixa capacidade adaptativa e de resiliência da maioria da população. Neste sentido, a educação ambiental das diferentes faixas etárias pode constituir um recurso e uma estratégia de combate às alterações climáticas, preparando as crianças e os jovens como meios catalisadores de uma sociedade capaz de usar de forma racional e sustentável os recursos limitados do planeta.

Neste estudo, admite-se que Angola é, também, um dos países africanos afetados por um déficit significativo na educação ambiental geral. Pretende-

-se, assim, avaliar a situação da educação em Angola na área das alterações climáticas, recorrendo a um inquérito piloto sobre os conhecimentos gerais e a conscientização que diferentes amostras de população estudantil, em diversas regiões de Angola, têm sobre as alterações climáticas. Procedeu-se, assim, à avaliação da situação da educação em Angola na área das alterações climáticas por meio dum inquérito baseado no artigo subordinado ao tema “Mudança Climática na Sala de Aula”, do curso da UNESCO para professores do ensino secundário sobre Educação em Mudanças Climáticas e Desenvolvimento Sustentável. Este inquérito inclui questões de resposta Sim/Não (ver Tabela 1) e também questões de resposta aberta.

TABELA 1. Questionário Sim/Não do inquérito sobre as alterações climáticas em Angola.

Questão	
1	Já ouviu falar sobre a atmosfera?
2	Tem noção da importância da camada de ozono?
3	Tem conhecimentos sobre alterações climáticas?
4	Já ouviu em algum lugar comentários sobre alterações climáticas?
5	Acha importante abordar as alterações climáticas na sala de aula?
6	Ouviu falar sobre gases que danificam a camada de ozono?
7	No seu ponto de vista, acha necessário incorporar nos planos curriculares noções sobre alterações climáticas?
8	É necessário formar mais docentes vocacionados para lecionar e divulgar informações sobre alterações climáticas?
9	As atividades antrópicas são responsáveis pela aceleração das alterações climáticas?
10	Culpa as nações ricas pelas alterações climáticas?
11	Pode compartilhar uma história recente sobre alterações climáticas?
12	Considera as alterações climáticas não tão graves?
13	Sabe de alguma instituição que está preocupada com as alterações climáticas?
14	Sente que o seu estilo de vida e cultura está sob ameaça pelas alterações climáticas?
15	Tem lido ou ouvido previsões terríveis sobre alterações climáticas?
16	Tomou conhecimento sobre extinções de espécies por causa das alterações climáticas?
17	Acha que os nossos descendentes viverão num planeta saudável nos próximos 100 anos?

MÉTODOS DE RECOLHA DE DADOS

O inquérito foi conduzido em ambiente de sala de aula das instituições participantes, exigindo da parte dos estudantes o preenchimento de informação pessoal e resposta aos respetivos questionários em papel. As respostas foram coligidas em documento Excel para posterior processamento e análise.

AMOSTRA

Para os inquéritos foram selecionadas instituições de ensino secundário da região sudoeste de Angola, pois é uma das regiões angolanas onde são já evidentes alguns sinais dos efeitos das alterações climáticas. Na província de Benguela, por exemplo, observa-se uma progressiva expansão do deserto do Namibe (Moçamedes). Na tabela seguinte, estão indicadas as instituições e cursos participantes nos inquéritos, assim como os respetivos números de alunos de ambos os géneros.

TABELA 2. Instituições e cursos participantes no inquérito.

	Instituição de Ensino	Localização	Designação/Curso	Alunos	M	F
1	Instituto Superior Politécnico da Universidade Katyavala Buela	Benguela	Engenharia Mecânica	17	17	0
2	Colégio BG0007 Comandante Dangerous	Catumbela, Benguela	Ciências Físicas Biológicas 11ª classe	29	23	6
3	Instituto Médio Politécnico do Balombo	Balombo	Mecânica Máquinas e Motores 13ª classe	30	30	0
4	Instituto Médio Politécnico da Baía Farta	Baía Farta, Benguela	Ciências Físicas Biológicas 10ª classe	20	16	4
5	Escola do 1º ciclo do Ensino Secundário	Huambo - Usuma	Ciências Físicas Biológicas 9ª classe	27	17	10
6	Escola do 11º ciclo do Ensino Secundário	Município do Huambo	Ciências Físicas Biológicas 12ª classe	34	18	16
7	Academia Militar da Força Aérea Nacional	Catumbela, Benguela	Comando Tático	19	18	1
8	Instituto Médio de Cahama (Cunene)	Município de Cahama (Cunene)	Ciências Físicas e Biológicas	28	18	10
9	Instituto Médio de Cahama (Cunene)	Município de Cahama (Cunene)	Ciências Económicas Jurídicas 10ª Classe	25	19	6
10	Colégio Lubango	Huíla	10ª Classe	14	7	7
11		Vite-Vizale (Huila)	Ciências Económicas Jurídicas	7	6	1

TRATAMENTO E ANÁLISE DE DADOS DO INQUÉRITO SOBRE AS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS EM ANGOLA

Os questionários de resposta Sim/Não foram processados e analisados em Excel, calculando-se, para cada questão, a quantidade de respostas Sim. Estes valores foram convertidos para percentagem do número total de alunos de cada instituição/curso participantes do inquérito. É, assim, possível aferir eventuais diferenças nas respostas entre instituições/cursos diferentes. A Tabela 3 resume as percentagens de Sins, a média pesada para todas as instituições/cursos participantes e o correspondente desvio padrão. Na última coluna, é apresentada a diferença entre o valor objetivo e a média, DOM = Objetivo – Média. Para cada questão, o valor objetivo (100 ou 0) corresponde a uma população completamente consciente e conhecedora das alterações climáticas, das suas consequências e das medidas necessárias para a mitigação dos seus efeitos. Valores absolutos elevados da diferença DOM indicam déficit de conhecimento e/ou conscientização na problemática das alterações climáticas.

TABELA 3. Resultados do inquérito sobre as alterações climáticas em Angola.

Questões	Instituição/curso											Média	DSVP	Obj. Média
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11			
1	100	100	100	100	93	100	100	98	76	116	221	99	8	1
2	100	90	87	90	85	93	89	84	68	121	183	91	5	9
3	100	75	87	85	74	76	100	68	76	136	221	86	11	14
4	100	79	87	85	70	47	100	68	76	136	221	78	18	22
5	100	81	90	90	78	71	100	68	76	136	221	85	13	15
6	84	79	80	75	74	76	73	54	60	107	214	79	7	23
7	88	97	90	75	63	68	100	68	76	136	221	82	14	20
8	88	83	90	90	89	88	89	83	68	121	183	90	2	30
9	88	59	57	55	11	44	83	83	38	86	171	56	16	64
10	65	31	63	40	75	41	51	36	40	71	183	50	16	68
11	37	50	50	80	78	65	37	32	36	64	129	69	14	90
12	24	31	13	30	30	24	13	7	8	14	29	30	15	90
13	35	34	33	20	37	29	50	36	40	71	183	36	11	68
14	60	72	67	80	34	53	73	34	50	107	214	64	13	26
15	100	60	63	75	78	65	37	32	36	64	129	69	14	91
16	71	82	57	80	30	37	84	57	58	114	229	53	21	25
17	35	28	23	40	30	32	5	4	4	7	14	28	11	28

Com base nos resultados obtidos, pode-se extrair as seguintes conclusões:

- As respostas ao questionário Sim/Não evidenciam uma razoável uniformidade no grau de conhecimento e de conscientização da problemática das alterações climáticas nas amostras estudantis das 11 instituições/cursos participantes no inquérito. Tal pode ser aferido pelos valores relativamente baixos dos correspondentes desvios padrão;
- Embora as questões 1-8 apresentem valores relativamente baixos do parâmetro DOM (mínimo: 1%; máximo: 22%), indicam, contudo, que existem deficiências na cultura geral científica que é de todo necessário mitigar por meio da inclusão da problemática das alterações climáticas nos programas escolares em Angola;
- Observam-se valores significativamente elevados (mínimo: -30%; máximo: 64%) no parâmetro DOM para as questões 9-17. Estas questões abordam aspetos intrínsecos ao carácter global das alterações climáticas, pelo que valores DOM elevados são indicadores de déficit de informação e da consequente conscientização sobre os efeitos globais das alterações climáticas.

Embora este estudo esteja ainda numa fase preliminar, podemos concluir que existe um déficit de conhecimento e conscientização sobre a problemática das alterações climáticas nas amostras estudantis de Angola analisadas, o que poderá ser corrigido pela reformulação dos programas escolares de Angola e pelo reforço dos recursos necessários à sua implementação.

Dada a grande diversidade das respostas ao questionário aberto deste inquérito, a sua análise complexa está ainda por finalizar.

AGRADECIMENTOS

O autor Guido Joaquim Prego agradece o apoio recebido da GALP para participar do evento.

REFERÊNCIAS

- Adebayo, A. A. & Oruonye, E. D. (2013). An Assessment of Climate Change in Taraba state, Nigeria. *Nigerian Journal of Tropical Geography*, 4(2), 602-612.
- Frank, P. (2008). A Climate of Belief: The Claim that Anthropogenic Carbon dioxide (CO₂) is Responsible for the Current Warming of the Earth's Climate is Scientifically Unsupportable, Because Climate Models are Unreliable. *Skeptic*, 14(1), 22-30.
- Hazo, A. I., Sawa, B. A. & Musa, M. (2019). Assessment of Climate Change Awareness and Risk Perception Among Rural People in Funtua Local Government Area, Katsina State, Nigeria. *International Journal of Trend in Scientific Research and Development (IJTSRD)* 3(2), 29-37. ISSN: 2456-6470.
- IPCC. (2007). *Special Report on Regional Impacts of Climate Change*. Summary for Policy Makers. Retrieved from <http://www.ipcc-wg1-ucar.edu/wg1/wg1-report.htm>.
- Lopez, B. (1998). *About this Life: Journeys on the Threshold of Memory*. New York: Knopf.
- Lotz-Sisitka, H. (2010). Climate Injustice: How Should Education Respond? In Kagawa, F. & Selby, D. *Education and Climate Change: Living and Learning in Interesting Times*. New York: Routledge.
- McCarthy, J. J. & White, K. S. (2001). *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Third Assessment Report, IPCC Working Group3: Cambridge University Press, Cambridge.
- Mings, L. (2008). Determination of Knowledge, Attitude and Practices on Climate Change Issue. *Environmental Tourism Consulting*, 4(7), 33-37.
- Oxfam International. (2009). *Suffering the Science: Climate Change, People and Poverty*. London: Oxfam Briefing Paper.
- Pachauri, R. K. & Meyer, L. A. (Core Writing Team, Eds.). IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, Switzerland. (151 p.)
- Parry, M. L., Carizian, O. F., Palutikof, J. P., Vander, L., Paul, J. & Hanson, C. (Eds.). (2007). *Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the IPCC*. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).
- Stern, N. (2008a). *The Economics of Climate Change: A Review*. Retrieved from <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/179408/education/47722/Problems-and-tasks-of-African-education-in-the-late-20th-century>.

- Stern, N. (2008b). *The Economics of Climate Change: A Review*. Retrieved from <http://www.hm-review-report.cf>.
- UNDP. (2009). *Linking Climate Change Policies to Human Development Analysis and Advocacy*. A Guidance for Human Development Report Teams.
- UNESCO. (1992). *United Nations Conference on Environment and Development: Agenda 21*. UNESCO, Switzerland.
- UNESCO. (1999). *Second International Congress on Technical and Vocational Education*. Final Report. Seoul, Republic of Korea, 26-30.
- UNESCO-UNEVOC (2004). International Centre for Technical and Vocational Education and Training.
- UNESCO. (2010). *The Ethical Implications of Global Climate Change*. World Commission on the Ethics of Scientific Knowledge and Technology (COMEST), UNESCO, 2010.
- UNESCO. (2013). UNESCO Course for Secondary Teachers on Climate Change Education for Sustainable Development (CCESD). ISBN 978-92-3-001113-0. Selby D. and Kagawa F. (authors). Sustainability Frontiers.
- UNESCO. (2014). CC BY-NC-AS (2014). Climate change in the classroom: UNESCO course for secondary teachers on climate change education for sustainable development. Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (UNESCO).
- Washington, H. & Cook, J. (2011). *Climate Change Denial: Head in the Sand*. London: Earth-Scan. (p. 43-46).

IMPORTÂNCIA DAS OBSERVAÇÕES SISMOLÓGICAS NAS ILHAS – OS CASOS DOS AÇORES, MADEIRA, CABO VERDE E REUNIÃO

THE IMPORTANCE OF SEISMOLOGICAL OBSERVATIONS IN THE ISLANDS – THE CASES OF THE AZORES, MADEIRA, CAPE VERDE AND REUNION

Graça Silveira¹

RESUMO

As observações sismológicas nas ilhas são extremamente importantes na caracterização da estrutura interna, tanto à escala regional como à escala global. A análise dos tempos de propagação dos diferentes tipos de ondas sísmicas geradas na sequência de sismos, ou da interação entre os oceanos e a Terra sólida, este último designado como ruído microssísmico, permite conhecer o interior da Terra e monitorizar alguns dos fenómenos que nela acontecem. Em ilhas onde a sismicidade é moderada ou quase inexistente, como é o caso de Cabo Verde ou da Madeira, é possível, a partir do estudo das ondas geradas por sismos distantes ou por ruído microssísmico, caracterizar a estrutura em profundidade, com objetivos puramente científicos, mas também socioeconómicos, como, por exemplo, a avaliação do potencial geotérmico, a caracterização das câmaras magmáticas, ou ainda a monitorização de erupções vulcânicas, como na ilha da Reunião, no Oceano Índico. Por outro lado, alguns dos trabalhos realizados nos Açores e em Cabo Verde mostram que, mesmo com uma única estação, é possível cartografar as principais descontinuidades internas da Terra e, a partir da análise da anisotropia, caracterizar o fluxo mantélico. Por fim, é importante referir que uma boa caracterização da estrutura e dinâmica dos *hotspots* sob as ilhas oceânicas contribui para a melhor compreensão da convecção, no manto, da geodinâmica global. Apesar dos inúmeros trabalhos nesse sentido, a caracterização da estrutura profunda das ilhas vulcânicas do Atlântico, em particular no Atlântico central e Sul, está ainda longe de estar concluída, em parte devido à falta de observações sismológicas. Num planeta maioritariamente coberto por oceanos, apesar dos enormes avanços observados nas observações sismológicas no fundo do mar, o número de estações sismológicas em ilhas continua a ter um papel crucial para uma melhor cobertura dos trajetos sismo-estação às escalas regional e global.

Palavras-chave: Sismologia, Ilhas, Estrutura sísmica, Monitorização.

EXTENDED ABSTRACT

Seismological observations on the islands are essential to characterize the subsurface structure, from the crust to the deep mantle, at both regional

¹ Instituto Dom Luiz e Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, mdsilveira@fc.ul.pt

and global scales. Analysis of the propagation times of the different types of seismic waves, generated by earthquakes, or due to the interaction between the oceans and the solid Earth, the latter known as microseismic ambient noise, allows to characterize the Earth's interior, but also to monitor some events like landslides, volcanic eruptions or ocean storms.

A better knowledge on the structure and dynamics of hotspots under most of the oceanic islands contributes to understand the processes of interaction between the Earth's interior and the Earth's surface. Therefore, oceanic islands and the associated hotspots are of great interest for the theory of the Earth. Despite the numerous efforts in this direction, the characterization of the deep structure of the volcanic islands of the Atlantic, particularly in the central and southern Atlantic, is still far from being completed, partly due to the lack of seismological observations. Notwithstanding the enormous advances observed in the seismic observations on the seafloor, long term deployment of ocean bottom seismometers is still very expensive, and several technical issues are yet to be solved. So, on a planet mostly covered by oceans, the number of seismological stations on islands continues to play a crucial role in obtaining a better geometry of the earthquake-station and station-to-station paths distribution at all spatial scales.

Some islands, such as Madeira and the Cape Verde, have moderate or almost inexistent seismicity. By applying the two-station method to surface waves, excited either by distant earthquakes or microseismic ambient noise, it is possible to study the local subsurface structure between the two stations. This method overcomes some limitations ascribed to traditional passive methods (e.g.: source-receiver geometry and/or sparse and irregular seismicity distribution) and allows to image regions with a resolution that mainly depends on the network design. Based on the study of the wavefield generated by cross-correlation of the microseismic ambient noise cross-correlation (Matos et al., 2015) or distant earthquakes (Carvalho et al., 2019b), it is possible to characterize the inner earth structure with purely scientific objectives. But these studies can also be conducted with a socio-economic purpose, such as the assessment of geothermal potential (Matos et al., 2015) or the characterization of magmatic chambers and the monitoring of volcanic eruptions, like in the Reunion Island (Brenquier et al., 2008).

On the other hand, some of the work carried out in the Azores (Silveira et al., 2010) and Cape Verde (Vinnik et al., 2012), show that even with a single station, it is possible to map discontinuities in the Earth's crust and mantle. These discontinuities cause seismic waves from distant earthquakes to be converted from P to S waves or vice versa, or to be multiply reflected between discontinuities before arriving the stations. By measuring the time delay between the direct and the converted phases is possible to locate inner Earth interfaces. The cartography of the small-scale topographic variations on crustal and mantle discontinuities provide important constraints on the thermal influence of

upwellings. Single station anisotropy measurements. by detecting shear wave splitting or by measuring the direction of the fastest shear wave speed, permits to characterize mantle flow (Morais et al., 2015; Diaz et al., 2015).

Microseismic ambient noise results from the interaction of ocean waves, generated by wind, with either the seafloor or other ocean waves (Carvalho et al., 2019a). Because it carries information on ocean waves (source), the microseismic wavefield started in the last decade to be advantageously used to image and locate ocean storms. Such imaging is also of interest both to climate studies – by extending the record of oceanic activity back into the early instrumental seismic record – and to real-time monitoring – where real-time seismic data can potentially be used to complement the spatially dense but temporally sparse satellite meteorological data (Custódio et al., 2020).

Key-words: Seismology, Islands, Seismic structure, Monitorization.

INTRODUÇÃO

Embora a tectónica de placas seja capaz de explicar com sucesso grande parte do vulcanismo e da sismicidade à escala global, existem vulcões, frequentemente afastados dos limites das grandes placas que não são tidos em conta nestes processos. Em ilhas vulcânicas, o estudo dos *hotspots* a elas associados é fundamental, quer para o conhecimento da composição e estrutura da Terra, quer para o conhecimento dos processos que envolvem as trocas de massa e de calor no seu interior e entre o interior e a superfície.

A relação entre os *hotspots* e a estrutura profunda, bem como as causas para o magmatismo observado nestes ambientes vulcânicos, é um tema ainda em discussão. Um maior conhecimento desta temática é crucial do ponto de vista científico, mas também de um ponto de vista socioeconómico, como, por exemplo, na avaliação do potencial geotérmico, na caracterização das câmaras magmáticas, ou ainda na monitorização de erupções vulcânicas e de escorregamentos de vertentes.

A sismologia é uma das melhores ferramentas na resposta às questões acima colocadas. Com efeito, devemos aos grandes sismos muito do que hoje sabemos sobre o interior da Terra. Sempre que ocorre um sismo, dá-se a libertação de grandes quantidades de energia que se propagam na Terra sob a forma de ondas. À medida que estas atravessam o planeta, vão sendo refractadas, reflectidas e atenuadas pelos diferentes tipos de materiais que constituem o seu interior, de forma análoga ao que acontece a um raio de luz ou a uma onda sonora quando atravessa diferentes meios. Foi a partir do comportamento das ondas sísmicas que Mohorovicic (1857-1936), Gutenberg (1889-19060) e Lehmann (1988-1993) identificaram as principais descontinuidades do interior da Terra.

Além dos eventos sísmicos, sejam eles de natureza tectónica ou de natureza vulcânica, as estações sísmicas registam permanentemente uma vibração de fundo que resulta do acoplamento de energia entre os oceanos e a Terra sólida – o ruído microssísmico. Apesar deste ruído ser conhecido desde meados do século XX, o trabalho pioneiro de Shapiro & Campillo (2004) teve o mérito de mostrar que as funções geradas a partir da correlação cruzada do ruído sísmico ambiente entre pares de estações, designadas por funções empíricas de Green, eram análogas às ondas superficiais registadas na sequência de um sismo. Estavam dados os primeiros passos para os estudos de sismologia sem sismos.

Neste trabalho, apresentar-se-ão alguns estudos feitos maioritariamente em ilhas do Atlântico Norte com a participação da autora. Utilizaram-se algumas metodologias sísmicas em ambientes onde a sismicidade é esparsa ou praticamente inexistente. As medidas foram efectuadas usando uma rede de estações sísmicas, mas, em alguns dos casos, a análise é feita individualmente sob cada estação.

SISMOLOGIA COM TELESISMOS

CARTOGRAFIA DAS DESCONTINUIDADES NO INTERIOR DA TERRA

As descontinuidades na Terra, tais como a Moho, o limite litosfera-as-tenosfera, ou as descontinuidades na zona de transição entre o manto superior e o manto inferior, estas últimas designadas como a 410 e 660 km, caracterizam-se por um contraste nas velocidades das ondas P e S. O conhecimento da profundidade destas descontinuidades contribuiu significativamente para investigar o comportamento da litosfera em zonas de subducção, onde as placas litosféricas mergulham no manto, ou zonas de ascensão de material, como é o caso dos *hotspots*. Quando uma onda P, gerada por um sismo distante, atravessa uma destas descontinuidades, parte da sua energia converte-se numa onda S. Essa fase convertida, denominada Ps, chega ao receptor mais tarde do que a onda P directa, uma vez que as ondas S têm velocidade inferior à das ondas P (Figura 1). De forma análoga, também uma onda S, ao atravessar um meio com contraste de velocidade, verá parte da sua energia convertida em P. Mas, neste caso, a fase convertida é a primeira a ser registada, pelos motivos já acima referidos. O intervalo de tempo entre as fases convertidas e as fases directas é função da espessura das camadas atravessadas e da velocidade dessas mesmas camadas. Esta metodologia, conhecida como *Receiver Functions*, permite, a partir da identificação das ondas directas e das fases convertidas, conhecer a profundidade das principais interfaces do interior da Terra e, em alguns casos, obter um modelo de velocidade das ondas S.

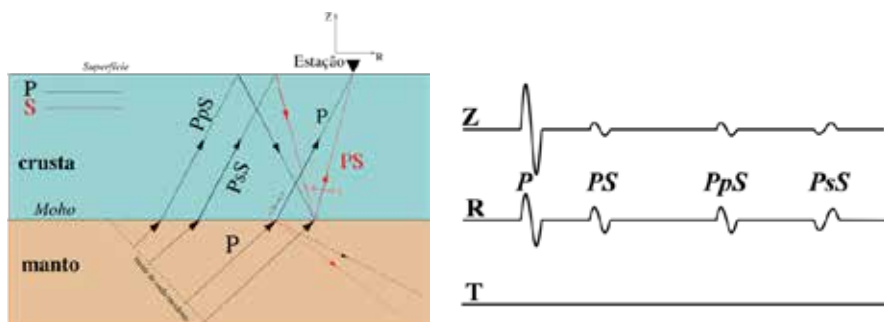


FIGURA 1. Esquema de propagação de uma onda P que sofre conversão ao atravessar a descontinuidade de Mohorovičić (habitualmente designada como Moho). À direita, identificação das fases convertidas após desconvolução entre a componente vertical e a componente radial. Adaptado de Ammon (1991) e de Vergne et al. (2002).

Esta técnica foi aplicada a estações a operar no arquipélago nos Açores (Silveira et al., 2010) e em Cabo Verde (Vinnik et al., 2012). A Figura 2 mostra o conjunto de estações usadas em ambos os arquipélagos. A análise é feita estação a estação e é calculado um modelo de velocidades sob as diferentes estações.

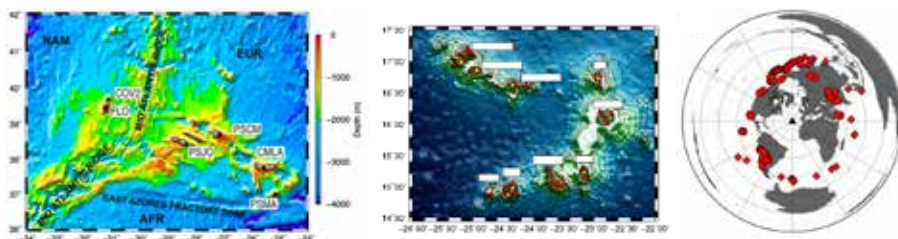


FIGURA 2. Localização de uma rede de estações sísmicas temporárias instaladas nos arquipélagos dos Açores entre 2002 e 2004 (à esquerda), e em Cabo Verde entre 2002-2004 e 2007-2008 (ao centro). À direita, localização dos eventos adequados à análise de *receiver functions*. Os eventos devem ter magnitude superior a 5.5 e ter distâncias epicentrais entre 30° e 90°. Adaptado de Silveira et al. (2010) e Vinnik et al. (2012).

A Figura 3 mostra os perfis de velocidade das ondas P, das ondas S e da razão V_p/V_s na estação CMLA em São Miguel (Açores) e na estação SAL no Sal (Cabo Verde). Em ambos os casos, é possível detectar a presença de um espessamento crustal. A análise dos tempos de chegada das fases convertidas nas descontinuidades 410 e 660 km e da forma de onda das funções receptoras na respectiva janela de tempo revelou a presença de uma anomalia de baixa velocidade na zona de transição do manto superior - manto inferior, tal como se descreve em ambos os trabalhos (Silveira et al., 2010; Vinnik et al., 2012).

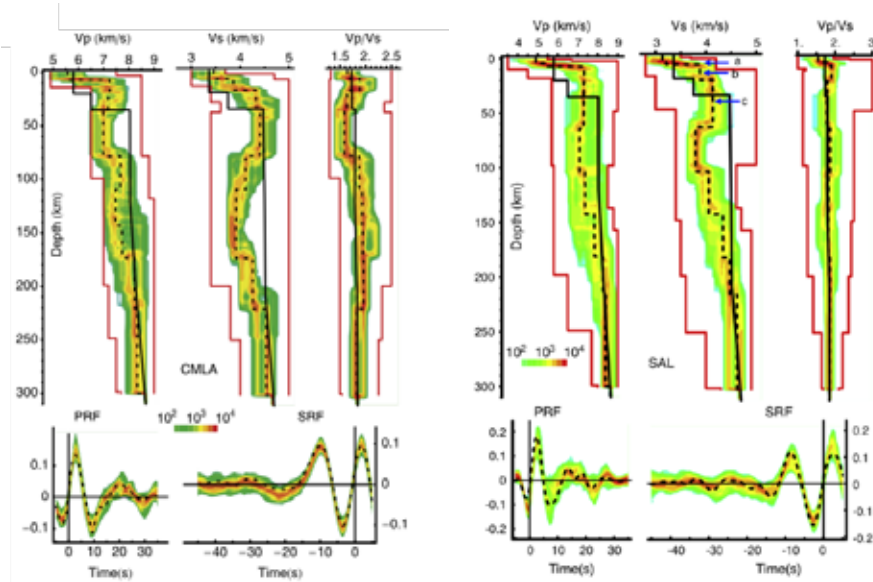


FIGURA 3. Modelos de velocidade das ondas P (V_p) e das ondas S (V_s) e da razão V_p/V_s obtidos a partir da inversão conjunta das *receiver functions* P_s e S_p . A família de soluções é apresentada sob a forma de histograma. A linha a tracejado marca a solução mais provável. A linha a preto é o modelo *a priori* e as linhas a vermelho delimitam o espaço para procura de soluções. Em baixo, o ajuste às formas de ondas das *receiver functions* medidas, representadas por uma linha a tracejado.

Adaptado de Silveira et al. (2010) e Vinnik et al. (2012).

CARACTERIZAÇÃO DO FLUXO MANTÉLICO

A origem da anisotropia sísmica do manto superior deve-se principalmente à orientação preferencial dos minerais que o constituem, em particular a olivina, que é o seu componente principal. Os dois processos básicos que resultam no desenvolvimento do alinhamento ou não da olivina do manto superior em regiões oceânicas podem ser o movimento passivo da litosfera sob uma astenosfera estacionária ou o fluxo na astenosfera.

Um meio anisotrópico provoca a birrefringência de uma onda S que nele se propague em duas fases ortogonais. Estas surgem separadas no tempo e com um movimento da partícula alinhado segundo as polarizações “rápida” e “lenta” no meio (Vinnik et al., 1989). A anisotropia ao longo de um trajecto pode ser estimada a partir da análise de uma fase S que se propague num meio anisotrópico com uma polarização conhecida, como, por exemplo, as SKS e as SKKS, ondas S que, ao atravessarem o núcleo externo, líquido, perdem o seu carácter transversal (Figura 4).

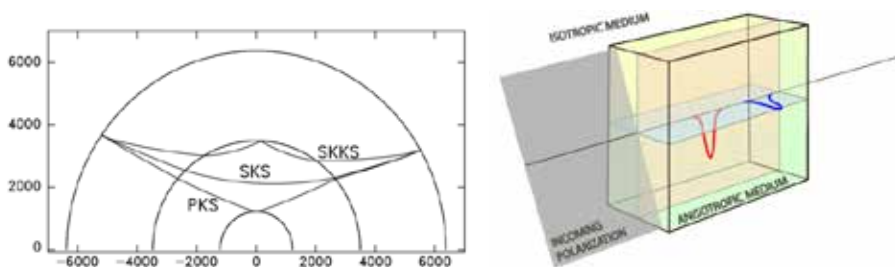


FIGURA 4. À esquerda, esquema de propagação das fases SKS, SKKS e ainda PKS (de Hall et al., 2004). À direita, birrefringência de uma onda S devido à presença de um meio anisotrópico (@ Ed. Garnero).

Em Portugal, esta metodologia foi aplicada a cada uma das estações instaladas em território continental (Morais et al., 2015; Diaz et al., 2015) e permitiu determinar a orientação do eixo rápido de propagação e o atraso no tempo entre a onda directa e a fase refringente. Recentemente, o mesmo estudo está a ser aplicado, no âmbito do projecto SIGHT (Schlaphorst et al., 2020), a um conjunto de estações a operar no arquipélago da Madeira e também nas Canárias.

MAPEAMENTO DA ESTRUTURA PROFUNDA

Utilizando dados de telessismos registados na rede temporária instalada em Cabo Verde (Figura 2) foi possível, a partir da correlação cruzada de sismogramas, medir a velocidade de fase do modo fundamental das ondas superficiais de Rayleigh (Figura 5). A inversão em profundidade da curva de dispersão média permitiu obter um modelo robusto de velocidades das ondas S (Figura 5) e caracterizar a litosfera e a astenosfera sob Cabo Verde, revelando um possível rejuvenescimento sob este *hotspot*.

SISMOLOGIA SEM SISMOS

A grande maioria das estações sísmicas encontra-se a operar em registo contínuo. Assim, além dos muitos eventos sísmicos que diariamente são registados, muito do que é arquivado corresponde a sinal de ruído ambiente, como se pode ver na Figura 6. Apesar deste ruído ser conhecido desde meados do século XX, só a partir do início deste século a qualidade e a quantidade de observações microssísmicas disponíveis permitiu que este ruído sísmico passasse a ser visto como sinal com informação.

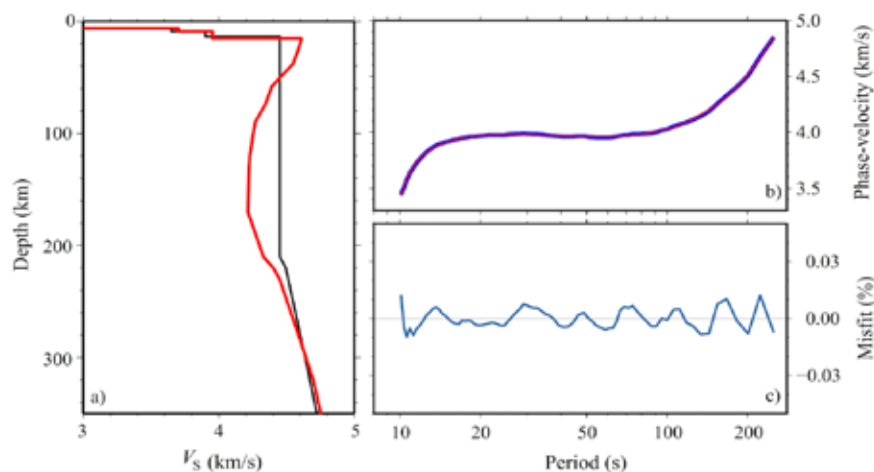


FIGURA 5. a) Resultado da inversão das velocidades de fase em função da profundidade (a vermelho) e modelo de velocidades num modelo de referência da Terra (a preto).
 b) Ajuste do modelo à curva média das velocidades de fase para o arquipélago.
 c) *Misfit* entre as velocidades medidas e as velocidades obtidas a partir do modelo de V_s .
 Adaptado de Carvalho et al. (2019b).

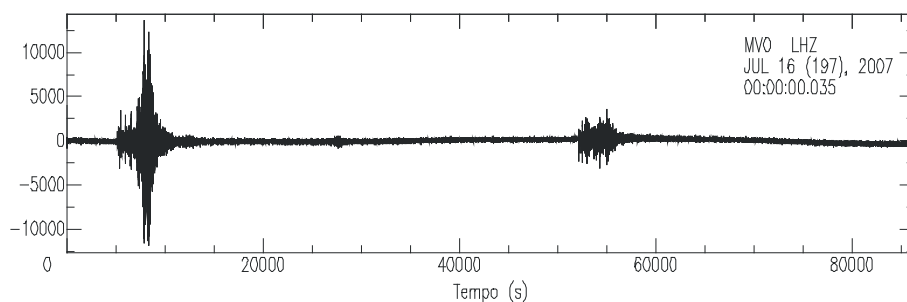


FIGURA 6. Registo sísmico numa estação da rede portuguesa. O registo dos sismos ocupa cerca de 10% desta série de um dia.

TOMOGRAFIA SÍSMICA

A tomografia sísmica pode utilizar como dados o tempo de percurso das ondas de volume, a velocidade de grupo ou a velocidade de fase das ondas superficiais. Estes vários tipos de onda têm uma propagação e períodos dominantes distintos e, por isso, permitem obter, a partir da resolução de um problema inverso, modelos da Terra em diferentes escalas e com diferentes resoluções. O objectivo da tomografia é obter uma distribuição das perturbações da velocidade das ondas sísmicas de volume (P e/ou S) em função da profundidade. Estas perturbações, por sua vez, dependem dos parâmetros

elásticos do meio e da densidade, sendo estes últimos função da mineralogia e das condições termodinâmicas (pressão e temperatura). O desenvolvimento das redes sísmicas equipadas com estações de banda larga, combinado com o avanço dos meios de cálculo, permitiu a construção de modelos tomográficos cada vez mais detalhados, recorrendo a metodologias numéricas cada vez mais elaboradas. Contudo, o mapeamento das propriedades físicas da estrutura interna da Terra continua a apresentar limitações temporais e espaciais, impostas pelas geometrias fonte-receptor disponíveis.

Os trabalhos de Weaver e Lobkis em 2001 provaram, a partir de experiências de acústica em laboratório, ser possível conhecer a resposta elástica de um meio a partir da correlação cruzada de um campo de ondas difuso entre pares de receptores. Mais tarde, principalmente na sequência dos trabalhos de Shapiro & Campillo (2004) e de Shapiro et al. (2005), “vulgarizou-se” a caracterização da estrutura interna da Terra a partir da correlação dos dados de ruído ambiente. Uma espécie de “sismologia verde”, já que não são necessárias fontes destrutivas para gerar as ondas que vão “iluminar” a estrutura interna do planeta (Santos et al., 2013; Silveira & Custódio, 2020).

Em ilhas vulcânicas, a avaliação da profundidade da(s) câmara(s) magmática(s) é um elemento chave na avaliação do potencial geotérmico. Esta estimativa é, habitualmente, obtida a partir da integração de métodos petrológicos, geoquímicos e geofísicos, onde se inclui a tomografia sísmica.

Entre 2011 e 2012 estive a operar na ilha da Madeira uma rede de 23 estações sísmicas temporárias que permitiram obter um modelo tomográfico da estrutura mais superficial da Madeira (Figura 7). Os modelos obtidos apresentam uma boa correlação com a geologia superficial e permitem identificar uma anomalia de baixa velocidade na zona do Pico do Areiro e que se estende até 1,5 km de profundidade.

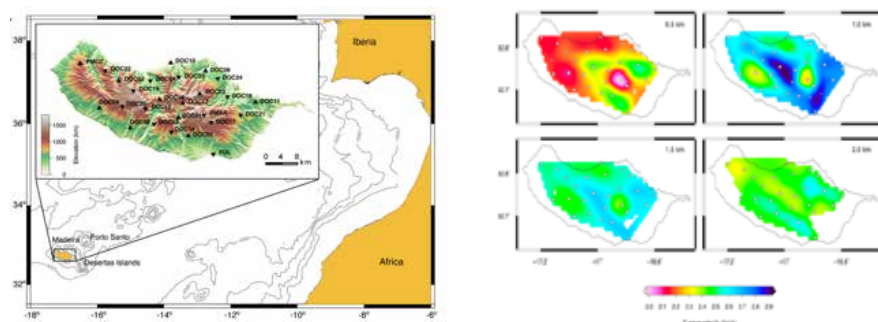


FIGURA 7. À esquerda, rede temporária instalada na ilha da Madeira. À direita, modelo de velocidade das ondas S para diferentes velocidades. Adaptado de Matos et al. (2015).

LOCALIZAÇÃO E RASTREAMENTO DE TEMPESTADES

A atividade oceânica, nomeadamente a interação das ondas do oceano com o fundo do mar ou com outras ondas oceânicas, é a principal fonte do ruído microssísmico registado nas estações sísmicas e que se propaga através da crosta e do manto, predominantemente, como ondas de Rayleigh. Como consequência, a análise desse sinal microssísmico permite a localização das principais fontes de ruído e da sua variabilidade no espaço e no tempo. Essa localização, no espaço e no tempo, é importante na interpretação das funções empíricas de Green obtidas por correlação cruzada do ruído microssísmico, mas permite também o rastreamento de tempestades.

Em 2019, Carvalho et al. mostraram, a partir da análise da polarização, que o sinal microssísmico registado em Cabo Verde é maioritariamente gerado na região central do arquipélago. A avaliação dos efeitos de sítio veio reforçar que a geomorfologia do arquipélago tem um forte impacto na geração do sinal microssísmico.

A comparação com os modelos oceânicos da altura média das vagas mostrou ainda que as grandes tempestades do Atlântico Norte não são responsáveis pelo ruído microssísmico registado no arquipélago.

Davy et al. (2014, 2015) estudaram registos sísmicos obtidos no fundo do Oceano Índico, ao largo de Madagáscar, e em ilhas do Índico, durante a passagem de ciclones tropicais. Os autores realçaram que este tipo de dados poderá ser considerado futuramente como uma nova fonte de informação na monitorização em tempo real de tempestades atmosféricas e oceânicas.

MONITORIZAÇÃO DE ESTRUTURAS COM O RUÍDO MICROSSÍSMICO AMBIENTE

As erupções vulcânicas são normalmente precedidas por um aumento de pressão do magma, o que leva ao empolamento do edifício vulcânico e à consequente deformação da sua estrutura. A monitorização deste processo em tempo real é um contributo valioso na previsão de erupções vulcânicas. Brenguier et al. (2008) mostraram, a partir da análise do ruído microssísmico ambiente, que as erupções do Piton de La Fournaise, na ilha da Reunião, eram precedidas de uma redução de velocidade.

Esta mesma metodologia foi aplicada por Kuo et al. (2018) em Taiwan e por Larose et al. (2015), entre outros, para a monitorização de avalanches induzidas por chuvas fortes. Os resultados mostram que nos dias que antecedem os deslizamentos de terras há uma redução nas velocidades de propagação.

CONCLUSÕES

As observações sismológicas em ilhas são importantes, quer à escala local, quer à escala global, tanto de um ponto de vista estritamente científico como de um ponto de vista socioeconómico.

Em regiões com fraca sismicidade, a utilização dos dados de telessísmicos, a par com um conjunto de ferramentas desenvolvidas em sismologia, permite caracterizar a estrutura profunda do nosso planeta. Esses estudos são particularmente importantes em ilhas vulcânicas pelo seu papel na dinâmica da Terra.

Por outro lado, a análise contínua do ruído sísmico ambiente possibilita uma monitorização efetiva e um imageamento 4D que antes parecia impossível. Medir as pequenas variações nas propriedades mecânicas da Terra ao longo do tempo permite-nos detectar alterações associadas a processos de deformação em falhas, monitorizar sistemas de exploração geológica e acompanhar a evolução dos sistemas magmáticos em vulcões.

REFERÊNCIAS

- Ammon, C. J. (1991). The isolation of receiver effects from teleseismic P waveforms. *Bulletin-Seismological Society of America*, 81(6), 2504-2510.
- Brenguier, F., Shapiro, N. M., Campillo, M., Ferrazzini, V., Duputel, Z., Coutant, O. & Nercessian, A. (2008). Towards forecasting volcanic eruptions using seismic noise. *Nature Geoscience*, 1(2), 126-130.
- Carvalho, J. F., Silveira, G., Schimmel, M. & Stutzmann, E. (2019a). Characterization of microseismic noise in Cape Verde. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 109(3), 1099-1109.
- Carvalho, J., Bonadio, R., Silveira, G., Lebedev, S., Mata, J., Arroucau, P., ... & Celli, N. L. (2019b). Evidence for high temperature in the upper mantle beneath Cape Verde archipelago from Rayleigh-wave phase-velocity measurements. *Tectonophysics*, 770, 228225.
- Custódio, S., Bolrão, F., Bui, T., Hadziioannou, C., Lima, M., Rodrigues, D., Sherifdeen, S., Silveira, G. & Carvalho, J. (2020). Predicting ocean activity from seismic data using machine learning techniques. European Geosciences Union General Assembly (EGU2020). *Geophysical Research Abstracts*, 22, EGU2020-22619 Vienna, May 9 – 13.
- Davy, C., Barruol, G., Fontaine, F. R., Sigloch, K. & Stutzmann, E. (2014). Tracking major storms from microseismic and hydroacoustic observations on the seafloor. *Geophysical Research Letters*, 41(24), 8825-8831.

- Davy, C., Stutzmann, E., Barruol, G., Fontaine, F. R., & Schimmel, M. (2015). Sources of secondary microseisms in the Indian Ocean. *Geophysical Journal International*, 202(2), 1180-1189.
- Díaz, J., Gallart, J., Morais, I., Silveira, G., Pedreira, D., Pulgar, J. A., ... & González-Cortina, J. M. (2015). From the Bay of Biscay to the High Atlas: Completing the anisotropic characterization of the upper mantle beneath the westernmost Mediterranean region. *Tectonophysics*, 663, 192-202.
- Hall, S. A., Kendall, J. M. & van der Baan, M. (2004). Some comments on the effects of lower-mantle anisotropy on SKS and SKKS phases. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 146(3-4), 469-481.
- Kuo, H. L., Lin, G. W., Chen, C. W., Saito, H., Lin, C. W., Chen, H., & Chao, W. A. (2018). Evaluating critical rainfall conditions for large-scale landslides by detecting event times from seismic records. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18, 2877-2891.
- Larose, E., Carrière, S., Voisin, C., Bottelin, P., Baillet, L., Guéguen, P., ... & Gimbert, F. (2015). Environmental seismology: What can we learn on earth surface processes with ambient noise? *Journal of Applied Geophysics*, 116, 62-74.
- Matos, C., Silveira, G., Matias, L., Caldeira, R., Ribeiro, M. L., Dias, N. A., ... & dos Santos, T. B. (2015). Upper crustal structure of Madeira Island revealed from ambient noise tomography. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 298, 136-145.
- Morais, I., Vinnik, L., Silveira, G., Kiselev, S. & Matias, L. (2015). Mantle beneath the Gibraltar Arc from receiver functions. *Geophysical Journal International*, 200(2), 1155-1171.
- Santos, F., Silveira, G. & Matias, L. (2013). Resolver o problema inverso para encontrar recursos e investigar o Interior da Terra. In Costa, F. P., Pinto, J. T. & Buescu, J. (Eds.). *Matemática do Planeta Terra*. IST Press, ISBN: 978-989-8481-26-9.
- Schlaphorst, D., Silveira, G., & Mata, J. (2020). Investigating Seismic Anisotropy of the Madeira and Canaries Hotspots Using Teleseismic and Local Shear-Wave Splitting with the SIGHT project. European Geosciences Union General Assembly (EGU20). *Geophysical Research Abstracts*, 22, EGU2020-9340 Vienna, 2020, May 9-13.
- Shapiro, N. M. & Campillo, M. (2004). Emergence of broadband Rayleigh waves from correlations of the ambient seismic noise. *Geophysical Research Letters*, 31(7).
- Shapiro, N. M., Campillo, M., Stehly, L. & Ritzwoller, M. H. (2005). High-resolution surface-wave tomography from ambient seismic noise. *Science*, 307(5715), 1615-1618.
- Silveira, G. & Custódio, S. (2017). Ondas do mar que iluminam o interior da Terra. *Gazeta de Física*, 40(3/4). ISSN 0396-3561.
- Silveira, G., Vinnik, L., Stutzmann, E., Farra, V., Kiselev, S. & Morais, I. (2010). Stratification of the Earth beneath the Azores from P and S receiver functions. *Earth and Planetary Science Letters*, 299(1-2), 91-103.

Vergne, J., Wittlinger, G., Hui, Q., Tapponnier, P., Poupinet, G., Mei, J., ... & Paul, A. (2002). Seismic evidence for stepwise thickening of the crust across the NE Tibetan plateau. *Earth and Planetary Science Letters*, 203(1), 25-33.

Vinnik, L. P., Farra, V., & Romanowicz, B. (1989). Azimuthal anisotropy in the Earth from observations of SKS at Geoscope and NARS broadband stations. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 79(5), 1542-1558.

Vinnik, L., Silveira, G., Kiselev, S., Farra, V., Weber, M. & Stutzmann, E. (2012). Cape Verde hotspot from the upper crust to the top of the lower mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 319, 259-268.

O CLIMA DA ÁFRICA AUSTRAL SOB 1,5°C E 2°C DE AQUECIMENTO GLOBAL, CONFORME SIMULADO PELOS MODELOS CLIMÁTICOS REGIONAIS DO *CORDEX*

THE SOUTHERN AFRICAN CLIMATE UNDER 1.5°C AND 2°C OF GLOBAL WARMING AS SIMULATED BY CORDEX REGIONAL CLIMATE MODELS

Genito Amos Maure¹
Izidine de Sousa Pinto²
Mzime Murisa-Ndebele³
Mavhungu Muthige⁴
Christopher Lennard⁵
Grigory Nikulin⁶
Alessandro Dosio⁷
Arlindo Meque⁸

RESUMO

Resultados de 25 simulações de modelos climáticos regionais da iniciativa africana de Redução de Escala Regional são usados para avaliar as mudanças projetadas de temperatura e precipitação na África Austral sob dois níveis de aquecimento global (GWLs), nomeadamente 1,5°C e 2,0°C, em relação a valores pré-industriais, sob o cenário RCP8.5. Nota-se um aumento robusto da temperatura em comparação com o período de controle (1971-2000), variando de 0,5°C a 1,5°C para o GWL de 1,5°C e de 1,5°C a 2,5°C para o GWL de 2,0°C. Prevê-se que áreas cobrindo a África do Sul e partes da Namíbia e Botsuana experimentem o maior aumento de temperatura, maior que o aquecimento médio global, particularmente durante a temporada de setembro a outubro e novembro. Por outro lado, abaixo do nível de 1,5°C, os modelos exibem uma redução robusta na precipitação de até 0,4 mm/dia (aproximadamente 20% dos valores climatológicos) sobre a Bacia do Limpopo e áreas menores da Bacia do Zambeze na Zâmbia, e também partes do Cabo Ocidental, na África do Sul. Os modelos projetam um aumento de

¹ Universidade Eduardo Mondlane, genito.maure@uem.ac.mz

² Climate System Analysis Group, University of Cape Town, África do Sul

³ Chinhoyi University of Technology, Zimbabwe

⁴ Council for Scientific and Industrial Research, África do Sul

⁵ Climate System Analysis Group, University of Cape Town, África do Sul

⁶ Rossby Centre, Swedish Meteorological and Hydrological Institute, Norrköping, Sweden

⁷ European Commission Joint Research Centre (JRC), Ispra, Italy

⁸ Instituto Nacional de Meteorologia (INAM), Maputo, Moçambique

precipitação de até 0,1 mm/dia na região central e oeste da África do Sul e no sul da Namíbia. Sob 2,0°C GWL, uma fração maior de terra enfrentará reduções robustas entre 0,2 e 0,4 mm/dia (cerca de 10% a 20% dos valores climatológicos) na maioria do subcontinente central e partes do oeste da África do Sul e norte de Moçambique. Estas reduções na precipitação são acompanhadas por aumento do número de dias secos consecutivos e diminuição de dias úmidos consecutivos na região. A importância de alcançar o Acordo de Paris é imperativa para a África Austral, uma vez que as mudanças projetadas sob 1,5°C e, mais ainda, 2,0°C GWL implicam riscos potenciais significativos para a produtividade agrícola e econômica, sistemas humanos e ecológicos, saúde e recursos hídricos, com aumento implícito no estresse hídrico regional.

Palavras-chave: Clima, África Austral, Acordo de Paris, Níveis de aquecimento.

EXTENDED ABSTRACT

Results from an 25 regional climate model simulations from the Coordinated Regional Downscaling Experiment Africa initiative are used to assess the projected changes in temperature and precipitation over southern Africa at two global warming levels (GWLs), namely 1.5°C and 2.0°C, relative to pre-industrial values, under the Representative Concentration Pathway 8.5. The results show a robust increase in temperature compared to the control period (1971-2000) ranging from 0.5°C-1.5°C for the 1.5°C GWL and from 1.5°C-2.5°C, for the 2.0°C GWL. Areas in the south-western region of the subcontinent, covering South Africa and parts of Namibia and Botswana are projected to experience the largest increase in temperature, which are greater than the global mean warming, particularly during the September-October-November season. On the other hand, under 1.5°C GWL, models exhibit a robust reduction in precipitation of up to 0.4 mm day⁻¹ (roughly 20% of the climatological values) over the Limpopo Basin and smaller areas of the Zambezi Basin in Zambia, and also parts of Western Cape, South Africa. Models project precipitation increase of up to 0.1 mm day⁻¹ over central and western South Africa and in southern Namibia. Under 2.0°C GWL, a larger fraction of land is projected to face robust decreases between 0.2 and 0.4 mm day⁻¹ (around 10%-20% of the climatological values) over most of the central subcontinent and parts of western South Africa and northern Mozambique. Decreases in precipitation are accompanied by increases in the number of consecutive dry days and decreases in consecutive wet days over the region. The importance of achieving the Paris Agreement is imperative for southern Africa as the projected changes under both the 1.5°C, and more so, 2.0°C GWL imply significant potential risks to agricultural and economic productivity, human and ecological systems health and water resources with implied increase in regional water stresses.

Key-words: 1.5° - 2°C Global Warming Levels; Paris Agreement; Southern Africa.

INTRODUÇÃO

O Acordo de Paris, alcançado em dezembro de 2015, responsabiliza os países signatários por manterem o aumento da temperatura média global bem abaixo de 2,0°C e particularmente abaixo de 1,5°C a partir do período pré-industrial, reconhecendo que “isso reduziria significativamente os riscos e impactos das mudanças climáticas”. As partes no acordo estão sujeitas a atingir esse limite no aquecimento, reduzindo as emissões de efeito estufa de acordo com as diretrizes dos planos nacionais de ação climática. Dado esse ímpeto em nível global, é de suma importância considerar as implicações dos limites de 1,5 e 2,0°C na temperatura média global da região da África Austral, que já possui um forte sinal de aquecimento projetado.

Tendências significativas da temperatura média anual foram relatadas para o sul da África, com taxas mais altas registradas na Namíbia e Angola no período de 1979 a 2007 (Morishima & Akasaka, 2010). Engelbrecht et al. (2015) relataram que as temperaturas na maior parte da região da África Austral devem aumentar entre 4°C e 6°C até o final do século, no cenário A2 (baixa mitigação) do Relatório Especial sobre Cenários de Emissão. Usando um conjunto de Modelos Regionais de Clima Regional (RCMs) e o pacote R RCLimDex para o cálculo de índices de precipitação, um estudo mostra que a parte ocidental da África Austral deve ficar mais seca com a frequência da seca e o número de ondas de calor aumentando no final do século XXI, no cenário A2 (Engelbrecht & Engelbrecht, 2016) e no Caminho do Clima Representativo (RCP) 4.5 e RCP 8.5 (Dosio, 2017). Esses fortes sinais de aquecimento e secagem mostraram-se consistentes com a maior parte da fase 3 do projeto de intercomparação do modelo acoplado (CMIP3) e com a fase 5 do projeto de intercomparação do modelo acoplado (CMIP5) (Taylor et al., 2012), atribuído ao futuro fortalecimento projetado das elevações subtropicais e da circulação anticiclônica de nível médio em cenários de baixa mitigação (Christensen et al., 2007; Engelbrecht et al., 2009; Engelbrecht et al., 2015, Déqué et al., 2017).

O clima da região da África Austral, definido aqui como uma região da África delimitada ao norte por latitude 10°S e ao sul por 38°S (ver Pinto et al., 2016), é influenciado pelas dinâmicas tropicais, subtropicais e de latitude média. com a maior parte das chuvas da região ocorrendo durante o período austral do verão. Os sistemas de chuvas mais importantes são os Trilhos Temperados Tropicais (TTTs), que representam cerca de 60% das chuvas de verão (Harrison, 1984). Outros sistemas são a Zona de Convergência Intertropical (ITCZ), que produz a maior parte das chuvas nas partes norte de Madagascar e África do Sul (Waliser & Gautier, 1993) e o Cut-off Low (COL), que ocorre durante as estações primavera e outono (Singleton & Reason, 2007). Verões austrais secos resultantes do aquecimento no Oceano Índico foram relatados

para a região (Hoerling et al., 2006). Isso é corroborado por New et al. (2006), que relataram diminuição da precipitação total (média regional) para o sul da África, embora a queda não tenha sido significativa. Além disso, os GCMs projetaram verões austrais invulgarmente secos, o que implica diminuição dos verões austrais úmidos no sul da África (Tennant, 2003; Bellprat et al., 2015). Por outro lado, os Modelos Climáticos Regionais (RCMs) projetaram um aumento nas chuvas de verão na escarpa oriental do sul da África, com sua atribuição de aumentar as chuvas convectivas e mudanças nas circulações da escala sinóptica (Fauchereau et al., 2003; Engelbrecht et al., 2009; Pinto et al., 2016). Dados os sinais de condições mais quentes e áridas observadas nas últimas décadas e na maior parte do sul da África (Morishima & Akasaka, 2010), este artigo examina os possíveis impactos das mudanças climáticas na temperatura e precipitação abaixo de 1,5°C e níveis de aquecimento global de 2,0°C na África Austral, utilizando um grande conjunto de RCMs do CORDEX. Isso é importante, pois informa a política de adaptação e mitigação do clima, o planejamento e a implementação para os países da região da África Austral e em consideração ao Acordo de Paris. O estudo faz parte de uma série de trabalhos gerados dentro das atividades de análise do CORDEX África (www.csag.uct.ac.za/cordex-africa/), com foco em Ocidente (Klutse et al., 2018), Leste (Osima et al., 2018), Central (Pokam et al., 2018) e pan Africa (Nikulin et al., 2018).

MÉTODOLOGIA

Foram analisados para este estudo dados simulados de temperatura e precipitação diária do conjunto de dados de simulação CORDEX. As simulações foram realizadas por 25 execuções de Modelos Regionais de Clima do CORDEX (uma combinação de 10 RCMs e 10 CMIP5 GCMs - listadas em Nikulin et al. (2018), cuja referência detalhada será inserida no momento da publicação final deste artigo) usadas em redução de GCMs que participam do CMIP5 em um domínio numérico, cobrindo todo o continente africano com uma resolução de 0,44 graus, para o clima passado (1950-2005) e futuro (2006-2100) sob o cenário RCP8.5. Verificou-se que os RCMs do CORDEX são capazes de simular a variação mensal das chuvas, o momento da estação chuvosa e as frequências relativas de eventos de chuvas de intensidades variadas na África Austral muito bem (Shongwe et al., 2014; Pinto et al., 2016; Dosio et al., 2015; Dosio & Panitz, 2016). Para informações detalhadas sobre os modelos e suas configurações para o experimento CORDEX, os leitores são encaminhados para Nikulin et al. (2012). As simulações climáticas para o cenário de alta emissão, ou seja, o RCP 8.5, são analisadas, pois compreendem o maior conjunto (25 execuções) e podem ser consideradas o cenário de negócios mais

usual, mais realista, dada a trajetória atual das emissões de gases de efeito estufa. A precipitação e a temperatura média nos modelos CORDEX são extraídas por um período de 30 anos identificado pelo GCM acionador e comparadas com as do período de controle de 1971 a 2000. A metodologia para determinar o momento em que os níveis de aquecimento global (GWL) são atingidos e a quantificação da robustez dos sinais de mudanças climáticas desta coleção de foco são descritas em Nikulin et al. (2018). Resumimos essas metodologias muito brevemente abaixo e encaminhamos o leitor para Nikulin et al. (2018).

Definimos as GWLs como a GWL média que está acima de qualquer período da linha de base (por exemplo, 1,5 e 2°C). Embora existam definições diferentes de GWLs na literatura, geralmente todas começam com alguma linha de base pré-industrial (PI) e usam um período médio de janela, por exemplo 15, 20 ou 30 anos para calcular a saída da linha de base e determinar quando o GWL de interesse é atingido. Usamos o período de 1861 a 1890 para definir o período do PI, pois está disponível em todas as simulações históricas do CMIP5. Então, para cada GCM reduzido, o tempo da GWL relevante é definido como a primeira vez que a média móvel de 30 anos (ano central) e a temperatura média global estão acima de 1,5 ou 2°C em comparação com a média do PI. O período de 30 anos correspondente é então extraído do RCM em escala reduzida para análise usando 1971-2000 como período de controle.

Também existem muitas metodologias usadas para determinar a robustez de um sinal de mudança climática (ver Collins et al., 2013). Consideramos um sinal de mudança climática robusto se as duas condições a seguir forem atendidas:

1. Concordância entre modelos, ou seja, mais de 20 (80%) das simulações de modelo concordam com o sinal da mudança;
2. A razão sinal-ruído (SNR), isto é, quando a razão da média para o desvio padrão do conjunto de sinais de mudança climática for igual ou superior a um.

O primeiro critério considera a concordância do modelo e o segundo é uma medida da força do sinal de mudança climática (com relação à variabilidade intermodelo nesse sinal). Utilizamos ambos na definição de robustez, pois o primeiro critério pode ser cumprido mesmo no caso de uma alteração muito pequena e próxima de zero.

A temperatura e a precipitação simuladas para o período de controle e as mudanças projetadas sob os GWLs de 1,5°C e 2,0°C em relação ao período de controle são apresentadas em mapas sazonais e anuais. Também são mostradas diferenças entre as projeções de ambas as variáveis abaixo de 2,0°C e 1,5°C, bem como índices extremos, como dias secos consecutivos (CDD) e dias úmidos consecutivos (CWD). O CDD é definido como o maior número de dias consecutivos em que a precipitação é menor que 1 mm; uma precipitação maior que 1 mm caracterizará o CWD. Uma lista descritiva completa dos

índices pode ser encontrada no site da ETCCDI, http://etccdi.pacificclimate.org/list_27_indices.shtml.

RESULTADOS

Temperatura e precipitação modeladas para o período de controle (primeira coluna da Figura 1) durante a temporada de dezembro a janeiro e fevereiro (DJF) e suas mudanças projetadas para GWLs de 1,5°C e 2,0°C em relação ao período de controle (segunda e terceira colunas) são mostradas na Figura 1. As diferenças entre as projeções de ambas as variáveis abaixo de 2,0°C e 1,5°C também são mostradas (coluna mais à direita). Para mapas de precipitação, usamos hachuras com inclinação positiva para mostrar áreas onde o critério de concordância do modelo é atendido e hachuras para trás com inclinação negativa para mostrar áreas em que o critério SNR é atendido. Uma sobreposição das hachuras implica a robustez do sinal da mudança. Decidimos não mostrar hachura para temperatura em todas as figuras que apresentam essa variável, pois todos os modelos exibem um sinal robusto em toda a região. Sob GWLs de 1,5°C e 2,0°C, os modelos mostram uma mudança robusta de temperatura, variando de 0,5°C - 1,0°C nas áreas costeiras a 1,0° - 1,5°C em outras partes do subcontinente da África Austral para 1,5°C GWL e de 1,5°C - 2,0°C a 2,0°C - 2,5°C nas mesmas áreas sob o GWL de 2,0°C (Figura 1). Sob o último GWL, as temperaturas regionais são projetadas para aumentar até 0,8°C a mais do que o 1,5°C GWL, mais na região sudoeste do subcontinente, cobrindo a África do Sul e partes da Namíbia e Botsuana (Figura 1).

As mudanças projetadas na precipitação são muito mais variadas que a temperatura; no entanto, durante a temporada de DJF, os padrões espaciais de precipitação mudam sob as GWLs de 1,5°C e 2,0°C e parecem os mesmos, com áreas que cobrem o centro e o sul de Moçambique, sul do Zimbábue, leste e oeste da África do Sul, a maioria da Namíbia e sul de Angola, mostrando decréscimos na precipitação de até 0,4 mm dia⁻¹ (cerca de 10% dos valores climatológicos) (Figura 1). Por outro lado, as regiões restantes mostram um aumento na precipitação de até 0,4 mm dia⁻¹ após o período das duas GWLs. A comparação das duas GWLs mostra que, abaixo dos 2,0°C, a região da África Austral pode exibir quedas de precipitação entre 0,2 e 0,3 mm dia⁻¹ (cerca de 10% a 15% dos valores climatológicos), principalmente na África do Sul, Namíbia e partes de Botsuana, enquanto a região pode experimentar aproximadamente a mesma magnitude, mas sinal oposto, na mudança diária projetada da precipitação (Figura 1). No entanto, é importante observar que a incerteza dos modelos quanto às mudanças de precipitação é grande, pois menos de 80% dos modelos concorda com o sinal de mudança e a variabilidade intermodelo é maior que o sinal de mudança climática.

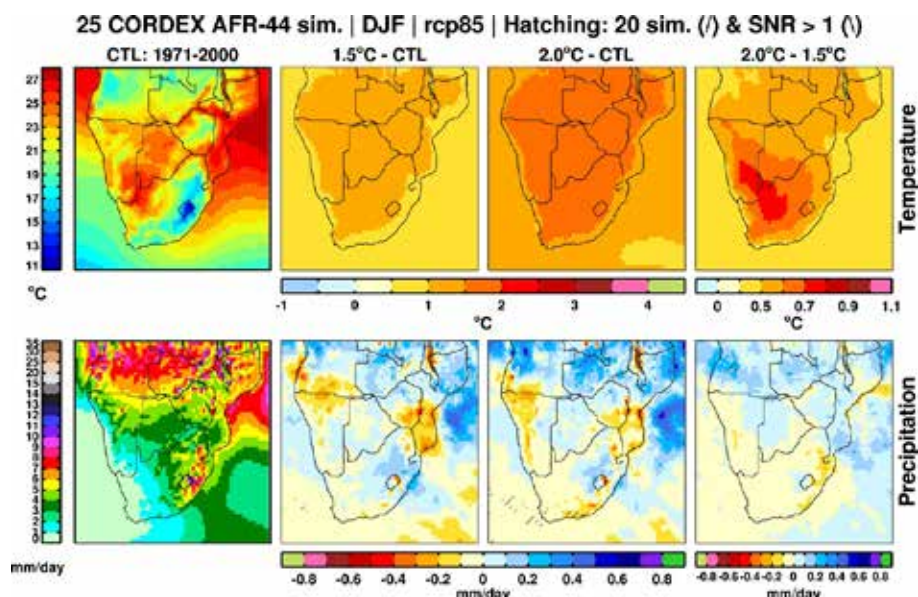


FIGURA 1. A temperatura média e a precipitação média do conjunto CORDEX África de dezembro a janeiro e fevereiro (DJF) para 1971-2000 (CTL, coluna da esquerda), as mudanças projetadas nos 1,5 e 2° GWLs em relação a 1971-2000 (colunas do meio) e a diferença entre as alterações de 2 e 1,5° GWLs (coluna mais à direita). As áreas em que pelo menos 80% das simulações (20 de 25) concordam com o sinal da mudança são marcadas por traços positivamente inclinados. As áreas em que a relação sinal/ruído é igual ou superior a 1 são marcadas por traços negativamente inclinados. Para a temperatura, todas as caixas da grade atendem aos dois critérios (a razão de concordância e sinal/ruído) e as linhas não são mostradas. Observe-se que as escalas de cores para os mapas de 2°C - 1,5°C são diferentes das de 1,5°C - CTL e 2°C - CTL.

Durante a temporada de setembro a outubro e novembro (SON), a estação das chuvas, os modelos CORDEX mostram uma mudança robusta de temperatura (linha superior), semelhante à da estação DJF, variando de 0,5°C a 1,0°C nas áreas costeiras a 1,0°C - 1,5°C em grande parte do interior, incluindo um trecho localizado nas fronteiras da Namíbia, Angola e Botsuana, que mostra um aumento de 1,5°C - 2,0°C abaixo da GWL de 1,5°C (Figura 2). Para o caso de 2,0°C GWL, os aumentos nas temperaturas regionais têm magnitude e padrão espacial próximos aos do DJF; no entanto, com um adesivo que cobre grandes partes do interior da sub-região, onde os aumentos em relação ao período de controle atingem até 2,0°C e 2,5°C. As projeções de temperatura abaixo de 2,0°C GWL são 0,5°C - 0,7°C graus mais altas que as de 1,5°C GWL perto de regiões costeiras. A diferença é maior – até 0,8°C – nas partes centrais da região (Figura 2).

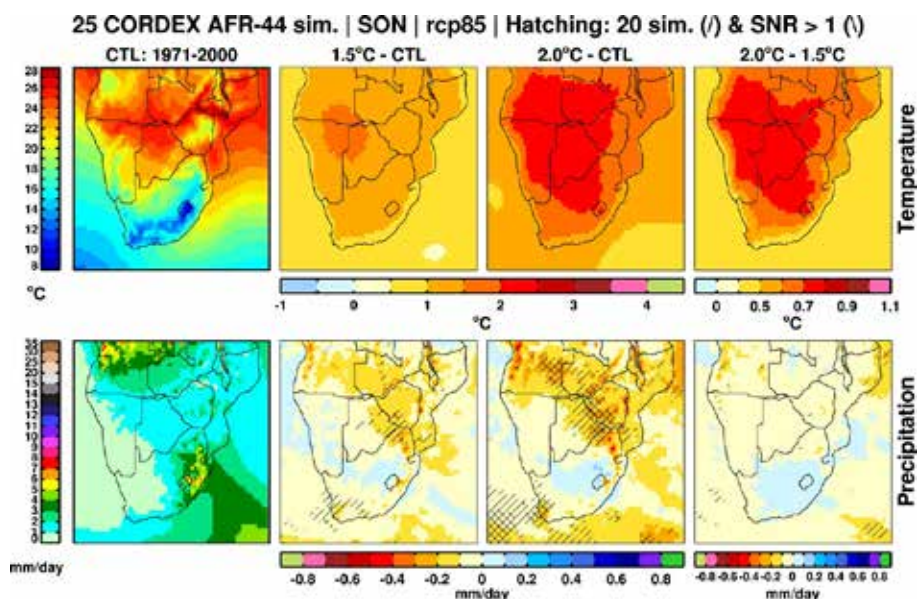


FIGURA 2. Igual à Figura 1, mas representando a estação de setembro-outubro-novembro (SON). As áreas em que pelo menos 80% das simulações (20 de 25) concordam com o sinal da mudança são marcadas por hachuras positivamente inclinadas. As áreas em que a relação sinal/ruído é igual ou superior a 1 são marcadas por hachuras negativamente inclinadas. Para a temperatura, todas as caixas da grade atendem aos dois critérios (a razão de concordância e sinal/ruído) e a eclosão não é mostrada. Observe que as escalas de cores para as plotagens de 2°C - 1,5°C são diferentes das de 1,5°C - CTL e 2°C - CTL.

Em relação à precipitação, o conjunto de modelos abaixo de 1,5°C GWL mostra uma redução robusta (de até 0,3-0,4 mm dia⁻¹) sobre a Bacia do Limpopo e áreas menores da Bacia do Zambeze, na Zâmbia, bem como em partes de Western Cape, na África do Sul, enquanto um aumento (embora não robusto) de até 0,1 mm dia⁻¹ na precipitação é projetado na África do Sul central e ocidental, bem como no sul da Namíbia (Figura 2). Abaixo de 2,0°C GWL, uma fração maior de terra é projetada para enfrentar uma queda robusta na precipitação, variando de 0,2 a 0,4 mm dia⁻¹ (ou seja, cerca de 10% a 20% dos valores climatológicos), em uma área diagonal que cobre a maior parte do subcontinente central e partes da África do Sul ocidental e norte de Moçambique (Figura 2). No entanto, não há robustez nas diferenças entre as alterações sob o GWL de 2,0°C e 1,5°C.

Um sinal consistente da temperatura média anual é visto na Figura 3, com mudanças positivas variando de 0,5°C a 1,0°C nas regiões costeiras a 1,0°C a 1,5°C em todo o continente, abaixo da GWL de 1,5°C. O padrão no GWL de 2,0°C não difere muito do padrão de 1,5°C em termos de padrão espacial; no entanto, as alterações podem chegar a 1,5°C - 2,0°C. Além disso,

um trecho que cobre grandes partes do norte e leste da Namíbia e áreas de países vizinhos limítrofes mostra um aumento de até 2,0°C a 2,5°C em relação ao período de controle. As diferenças das mudanças de temperatura projetadas entre essas duas GWLs mostram um sinal de aumento de temperatura na região, com os valores mais altos de 0,7°C a 0,8°C na região fronteiriça da Namíbia, Botsuana e África do Sul, diminuindo até 0,25°C - 0,5°C em direção às regiões costeiras (Figura 3).

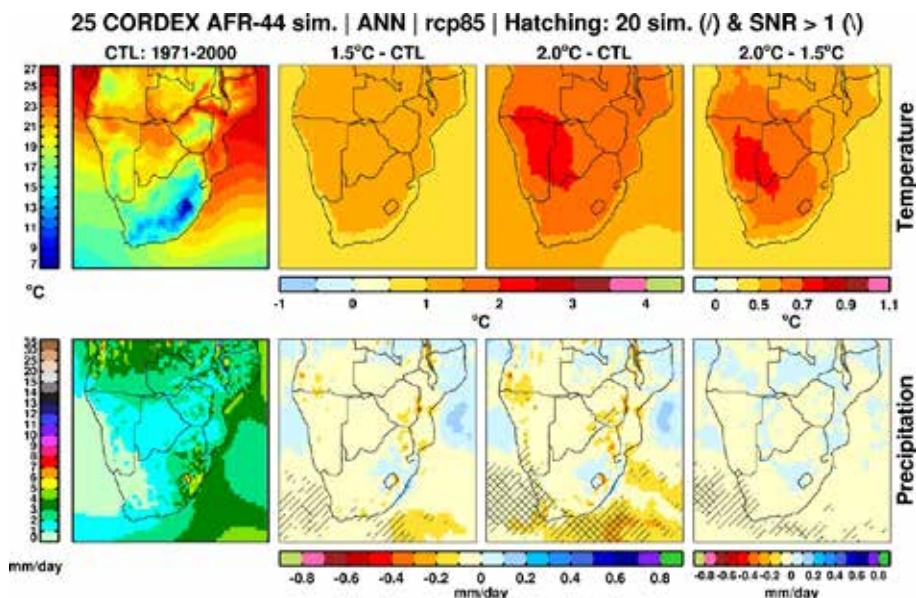


FIGURA 3. O mesmo que as figuras 1 e 2, mas para os valores médios anuais.

As mudanças projetadas de precipitação, por sua vez, mostram um padrão espacial semelhante para as GWLs de 1,5°C e 2,0°C em toda a região, embora mudanças significativas ocorram mais sobre a GWL de 2,0°C, particularmente nas costas ocidentais da África do Sul e sul da Namíbia e partes da Bacia do Limpopo, no Zimbábue e no leste de Botsuana, onde as reduções na precipitação diária podem chegar a 0,3 mm dia⁻¹. As mudanças projetadas na precipitação diária média anual abaixo de 2,0°C são geralmente 0,1 mm maiores que as GWLs abaixo de 1,5°C, especialmente na região oeste da África do Sul, perto da costa do Atlântico (região hachurada, canto inferior direito da Figura 3). Em geral, nos dois GLWs, as mudanças médias anuais de temperatura parecem ser dominadas pela estação do DJF (linha superior da Figura 2), enquanto as mudanças médias anuais da precipitação parecem ser dominadas pela estação do SON (linha inferior da Figura 3).

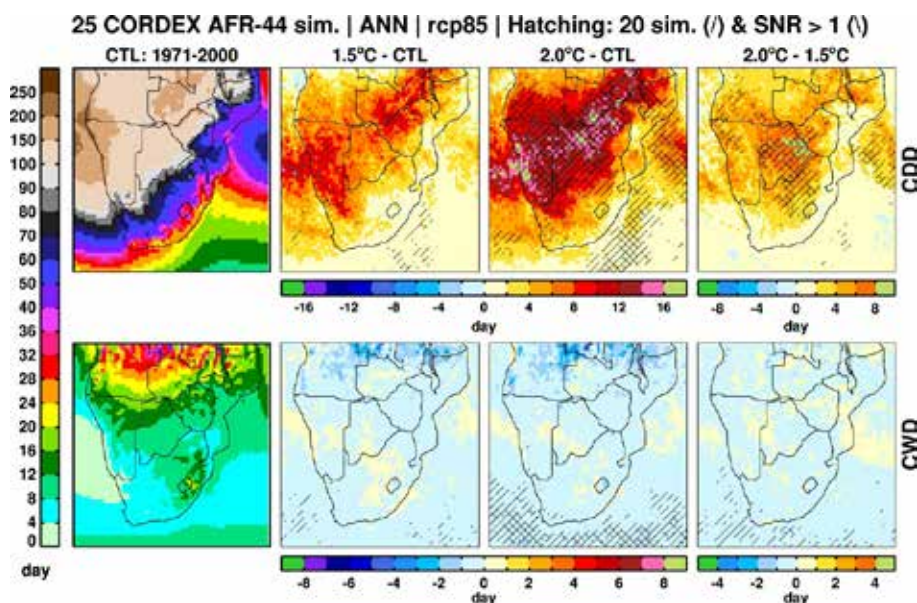


FIGURA 4. Período de controle com média anual e alterações projetadas de CDDs, na linha superior, e CWDs, na linha inferior, abaixo de 1,5 e 2,0°C GWLs.

Escotilha inclinada positivamente para mostrar áreas onde o critério de concordância do modelo é atendido e escotilha inclinada para trás negativamente para mostrar áreas em que o critério SNR é atendido.

Analisamos não apenas o clima médio, mas também dois índices de precipitação selecionados da Equipe de Especialistas em Detecção e Índices de Mudanças Climáticas (ETCCDI) que são baseados na precipitação diária, pois, sob o mesmo aquecimento, os extremos podem mudar de maneira diferente do clima médio. O número máximo de CDDs e o número máximo de CWDs foram escolhidos, pois são comumente usados em estudos de impacto e são relevantes na atual situação de seca no sul da África. O padrão de larga escala de CDD e CWD na escala de tempo anual é mostrado na Figura 4. O número máximo de CDD é projetado para aumentar em todo o subcontinente, com períodos secos mais longos projetados na Namíbia, Botsuana, norte do Zimbábue e sul da Zâmbia, abaixo de 1,5°C GWL. Abaixo de 2,0°C GWL, as CDDs são projetadas para aumentar em todo o subcontinente. Por outro lado, o CWD é projetado para diminuir no subcontinente com um sinal não robusto em todas as áreas terrestres (Figura 4).

DISCUSSÃO

O padrão geral de aumento de temperatura ao longo do ano é semelhante em ambos os GWLs e consistente com os resultados encontrados por outros pesquisadores, p. ex., Engelbrecht et al. (2015) e Déqué et al. (2017) para partes da África meridional e tropical. Em algumas áreas, os aumentos projetados de temperatura são iguais ou até maiores que os GWLs correspondentes. Um padrão semelhante foi encontrado por James & Washington, (2013) usando GCMs. Isso implica que essas áreas devem sofrer um aumento na magnitude e duração das ondas de calor (por exemplo, Russo et al., 2016; Dosio, 2017; Déqué et al., 2017) e risco de incêndio, conforme sugerido por Weatherly & Rosenbaum (2017). Consequentemente, é esperado um aumento da evapotranspiração como resultado do aumento da temperatura, com consequente redução da quantidade de umidade disponível no solo (por exemplo, Harmsen et al., 2009). Isso pode resultar em possível aumento da aridez em áreas já áridas a semiáridas. As implicações são o aumento do calor e extremos, como ondas de calor, bem como tempestades intensas, que já estão sendo observadas em toda a região.

Em comparação, nossos resultados no RCP 8.5 assemelham-se aos dos modelos EURO-CORDEX de alta resolução (12 km), que foram usados para avaliar quão bem eles podem simular o clima da região. Os conjuntos EURO-CORDEX conseguiram capturar algumas características do clima da região da Europa bem, mas não outras (Kotlarski et al., 2014). Por exemplo, Vautard et al. (2013) descobriram que simulavam eventos de ondas de calor muito frequentes com os conjuntos exibindo grandes simulações de propagação, mas projetavam padrões semelhantes de precipitação e temperatura seguindo as vias RCP 4.5 e RCP 8.5 (Jacob et al., 2014). Quando usado para simular índices de precipitação em uma grande cobertura espacial das Ilhas Escocesas, nenhum modelo único simulou bem todas as métricas de precipitação (Foley e Kelman, 2017). Isso ressalta a necessidade de avaliar os modelos em várias escalas espaciais. Além disso, é importante observar que nosso trabalho pode ter algumas ressalvas que devem ser consideradas, incluindo o fato de que a matriz GCM-RCM que usamos não está completa, ou seja, nem todos os RCMs reduziram todos os GCMs, com alguns GCMs sendo reduzidos por um ou poucos RCMs. Portanto, os resultados podem ser agrupados em relação a RCMs ou GCMs individuais (por exemplo, Dosio, 2017). No entanto, uma análise detalhada dessa questão está além do escopo deste estudo. Como mostrado por Dosio & Panitz (2016), RCMs e GCMs podem projetar sinais de mudanças climáticas muito diferentes; por exemplo, na África central, o sinal de mudança climática dos RCMs pode ser oposto ao sinal da condução de GCMs, devido a muitas causas, incluindo forças de grande escala e o *feedback*

entre a terra e a atmosfera. A investigação detalhada entre RCMs e GCMs será objeto de trabalho subsequente.

Parece que não existem diferenças significativas ou robustas nas mudanças projetadas de precipitação em ambos os GWLs, como em ambos os casos, as reduções médias sazonais e anuais na precipitação diária de 10% a 20% são sugeridas pelos modelos CORDEX. Resultados semelhantes foram encontrados por Haensler et al. (2013) na África Central. As reduções na CWD, que também se manifestam na redução da precipitação, juntamente com o aumento na CDD, têm implicações para o início sazonal da precipitação no sul da África (por exemplo, Tadross et al., 2005) e provavelmente terão impactos negativos na agricultura, particularmente nas áreas de chuvas tradicionais. Aumentos no CDD na África Austral também foram encontrados em Giorgi et al. (2014), mas no período de 2071 a 2100 em comparação com 1976-2005. Em uma escala de tempo sazonal (Figura S4, em material suplementar disponível em stacks.iop.org/ERL/13/065002/mmedia), SON é a estação com maiores mudanças no CDD após o MAM e o DJF. Condições mais secas durante o SON podem estar associadas a aumentos na frequência de ocorrência do padrão de circulação de alta pressão (por exemplo, Engelbrecht et al., 2009). Isso implica a necessidade de mudanças correspondentes nos setores de produção, como a agricultura, como alterar as variedades de culturas e animais de acordo e a necessidade de diversificação agrícola como medida de mitigação para combater a redução da produtividade agrícola devido às mudanças projetadas. As mudanças projetadas são considerações importantes, uma vez que na região sul da África uma parcela significativa (até 60%) dos PIBs é proveniente da agricultura e a maior parte da produção agrícola é alimentada pela chuva.

O aumento da aridez tem impactos potenciais em muitos setores produtivos, como a agricultura, tanto para as culturas como para o gado, e a produção baseada em ecossistemas, como a utilização da vida selvagem, a apicultura e a pesca, uma vez que as temperaturas e os limites ideais para os organismos vivos associados podem ser excedidos. Atualmente, grande parte do planejamento em torno desses setores, como previsões sazonais para datas de plantio, início e cessação da estação chuvosa, é baseada em informações climáticas arcaicas, que podem não acompanhar os aumentos projetados para o planejamento futuro, a adaptação, o enfrentamento e a resiliência contra as alterações climáticas e a variabilidade. Novamente, as implicações são preocupantes, uma vez que a maior parte (até 70%) das economias da região (exceto Botsuana e África do Sul) depende em grande parte da agricultura e, principalmente, da produção agrícola alimentada pela chuva (Mapfumo et al., 2014). Uma combinação de altas temperaturas e baixa precipitação sugerida por ambas as GWLs resultará na redução da disponibilidade de água para os setores agrícolas de sequeiro. Conforme destacado anteriormente neste artigo,

isso implica a necessidade de mudanças correspondentes na produção agrícola em termos de planejamento da produção agrícola por meio da agricultura de irrigação e planície de inundação.

Além disso, as reduções de precipitação nas duas principais bacias hidrográficas do sul da África (Limpopo e Zambeze) devem ser observadas, dada a natureza transfronteiriça (e, portanto, potenciais conflitos de uso da água) dessas bacias hidrográficas e os serviços significativos que prestam, incluindo geração de energia hidrelétrica (Zambeze) para a região, pesca, turismo e produção agrícola por meio da agricultura de irrigação e planície de inundação e muito menos dos ecossistemas que eles sustentam. As reduções projetadas nessas grandes bacias hidrográficas devem ser planejadas para reduzir a escassez de água, os conflitos e permitir o desenvolvimento de formas alternativas de energia, meios de subsistência e intervenções políticas apropriadas. A bacia do rio Zambeze, por exemplo, experimenta uma evapotranspiração potencial média anual alta de 1560 mm, que está acima da precipitação média anual (Beilfuss, 2012).

Em comparação com nossos resultados de reduções nas chuvas em partes desta bacia, Arnell (2004) projetou que as taxas de evaporação da bacia provavelmente aumentariam até 25% até 2100, usando um modelo hidrológico em escala macro e os cenários HadCM2 e HadCM3, com grande parte da superfície da bacia tornando-se mais seca (Kling et al., 2014; Pricope & Binford, 2012; SARDC & HBS, 2010). Da mesma forma, DeSanker & Magadza (2001) projetaram que uma redução de 20% na precipitação e um aumento de 25% na evaporação usando GCMs CMIP combinados com maior desenvolvimento e consequente extração de água na Bacia do Rio Zambeze resultariam em um declínio de 26% a 40% escoamento de água com consequentes reduções no fluxo do fluxo até 2100. De fato, reduções projetadas no fluxo entre 5% e 10% (Kling et al., 2014) foram associadas ao aumento das taxas de evaporação e transpiração resultantes de um aumento de 1°C na temperatura Bacia do Rio Zambeze (Chenje, 2000; Ndebele-Murisa et al., 2011; Magadza, 2010). Essas projeções concordam com reduções previstas de 11%, 23% e 30% no fluxo da corrente para aumentos de 2°C, 3°C e 4°C na temperatura, respectivamente, em outros sistemas hidrológicos (Henson, 2011). Além disso, a atual escassez de energia hidrelétrica na região da África Austral foi atribuída à redução da precipitação, levando à diminuição dos fluxos das correntes e dos níveis de água, resultando em uma maior frequência de racionamento de energia, particularmente na Bacia do Zambeze, onde algumas das principais usinas hidrelétricas (Kariba, Cabora Bassa, Kafue e Shire) fornecendo uma quantidade razoável de energia hidrelétrica para a região (Botsuana, Malawi, Moçambique, África do Sul, Zâmbia e Zimbábue).

CONCLUSÃO

Este artigo fornece resultados de projeções de um conjunto de 25 simulações regionais do conjunto de modelos CORDEX analisados para o sul da África, no que diz respeito à temperatura e à precipitação próximas à superfície. Isso é novidade, pois é a primeira publicação que fala de possíveis cenários sob GWL de 1,5 e 2,0 graus para a região da África Austral. Em vez da agregação tradicional “futuro *versus* passado” das estatísticas do modelo, consideramos dois períodos diferentes para o cenário, de modo que, em cada simulação de modelo, o nível de aquecimento global é de 1,5°C e 2,0°C em relação à temperatura média no período 1971-2000. Existem incertezas quanto às mudanças projetadas de temperatura e precipitação. No entanto, o clima abaixo de 2,0°C GWL é mais quente do que aquele abaixo de 1,5°C GWL em muitas partes do subcontinente, enquanto muitas partes da sub-região são projetadas para se tornarem mais secas. A implicação de manter o Acordo de Paris para a região não pode ser superestimada, pois os impactos nos sistemas agrícolas e nos recursos hídricos da região podem ser substancialmente reduzidos, limitando as temperaturas médias globais bem abaixo de 2,0°C e particularmente abaixo de 1,5°C GLW. Em termos de precipitação, a maior diferença entre o clima abaixo de 1,5°C GWL e 2°C GWL é vista durante a estação SON. Isso significa que diminuições na precipitação e aumentos no CDD podem ter mudado e causar atrasos no início da precipitação; isto tem potenciais impactos negativos nos setores da agricultura, energia, ecossistemas e água, em particular. Isso exige que alguma atenção seja focada nos esforços para manter o GWL abaixo de 1,5°C, uma vez que a mudança de 2,0°C nas temperaturas globais pode provavelmente ter sérias implicações na produção, nas economias e no desenvolvimento da região da África Austral.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer o apoio do governo sueco por meio da Agência Sueca de Cooperação Internacional para o Desenvolvimento (SIDA). Também reconhecemos o apoio logístico do CORDEX International Project Office, do Instituto Meteorológico e Hidrológico Sueco (SMHI) e do Grupo de Análise do Sistema Climático (CSAG) da Universidade da Cidade do Cabo. Também agradecemos a todos os grupos de modelagem que realizaram simulações do CORDEX-África e disponibilizaram seus dados por intermédio da Federação Internacional da Rede do Sistema Terrestre (ESGF) e dos dois revisores anônimos pelo valioso *feedback* fornecido sobre o manuscrito.

O autor principal agradece a bolsa GALP para participar na 3ª Conferência de Física dos Países de Língua Portuguesa, onde apresentou este artigo pela primeira vez à comunidade lusófona.

REFERÊNCIAS

- Arnell, N. W. (2004). Climate change and global water resources: SRES emissions and socio-economic scenarios. *Glob. Environ. Change*, 14, 31-52.
- Beilfuss, R. (2012). *Assessing Hydrological Risks and Consequences for Zambezi River Basin Dams. A risky climate for southern Africa hydro*. Berkeley, CA: International Rivers. (56 p).
- Bellprat, O., Lott, F. C., Gulizia, C., Parker, H. R., Pampuch, L. A., Pinto, I., Ciavarella, A. & Stott, P. A. (2015). Unusual past dry and wet rainy seasons over Southern Africa and South America from a climate perspective. *Weather Clim. Extremes*, 9, 36-46.
- Chenje, M. (2000). *State of the Environment: Zambezi River Basin*. Harare: IUCN/SADC.
- Christensen, J. H. et al. (2007). Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, A. B., Tignor, M. & Miller, H. L. (Eds.). *Regional climate projections*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Collins, M. et al. (2013). Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G. K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V. & Midgley, P. M. (Eds.). *Long-term climate change: projections, commitments and irreversibility*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Déqué, M., Calmanti, S., Christensen, O. B., Aquila, A. D., Maule, C. F., Haensler, A., Nikulin, G. & Teichmann, C. (2017). A multi-model climate response over tropical Africa at +2°C. *Clim. Serv.*, 7, 87-95.
- DeSanker, P. V. & Magadza, C. (2001). *Chapter 10 of the IPCC Working Group II, Third Assessment Report*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Dosio, A. (2017). Projection of temperature and heat waves for Africa with an ensemble of CORDEX. *Reg. Clim. Models Clim. Dyn.*, 49, 493-519.
- Dosio, A. & Panitz, H. (2016). Climate change projections for CORDEX-Africa with COSMOCLM regional climate model and differences with the driving global climate models. *Clim. Dyn.*, 46, 1599-1625.
- Dosio, A., Panitz, H.-J., Schubert-Frisius, M. & Lüthi, D. (2015). Dynamical downscaling of CMIP5 global circulation models over CORDEX-Africa with COSMO-CLM: evaluation over the present climate and analysis of the added value. *Clim. Dyn.*, 44, 2637-2661.
- Engelbrecht, C. J. & Engelbrecht, F. A. (2016) Shifts in Köppen-Geiger climate zones over southern Africa in relation to key global temperature goals. *Theor. Appl. Climatol.*, 123, 247-261.

- Engelbrecht, F. A., McGregor, J. L. & Engelbrecht, C. J. (2009). Dynamics of the conformal-cubic atmospheric model projected climate-change signal over southern Africa. *International J. Climatol.*, 29, 1023-1033.
- Engelbrecht, F., Adegoke, J., Bopape, M. J., Naidoo, M., Garland, R., Thatcher, M. & Gatebe, C. (2015). Projections of rapidly rising surface temperatures over Africa under low mitigation. *Environ. Res. Lett.*, 10, 8.
- Fauchereau, N., Trzaska, S., Rouault, M. & Richard, Y. (2003). Rainfall Variability and Changes in Southern Africa during the 20th century in the global warming context. *Nat. Hazards*, 29, 139-154.
- Foley, A. & Kelman, I. (2017) EURO-CORDEX regional climate model simulation of precipitation on Scottish islands (1971-2000): model performance and implications for decision-making in topographically complex regions. *Int. J. Climatol.*, 38, 1087-1095.
- Giorgi, F., Coppola, E., Raffaele, F., Diro, G., Fuentes-Franco, R., Giuliani, G., Mamgain, A., Llopart, M., Mariotti, L. & Torma, C. (2014). Changes in extremes and hydroclimatic regimes in the CREMA ensemble projections. *Clim. Change*, 125, 39-51.
- Haensler, A., Saeed, F. & Jacob, D. (2013). Assessing the robustness of projected precipitation changes over central Africa on the basis of a multitude of global and regional climate projections. *Clim. Change*, 121, 349-363.
- Harmesen, E. W., Miller, N. L., Schlegel, N. J. & Gonzalez, J. E. (2009). Seasonal climate change impacts on evapotranspiration, precipitation deficit and crop yield in Puerto Rico. *Agric. Water Manage.*, 96, 1085-1095.
- Harrison, M. S. J. (1984). A generalized classification of South African summer rain bearing synoptic systems. *J. Climatol.*, 4, 547-560.
- Henson, R. (2011). Warming world: Impacts by degree. *Natl Acad. Sci. USA*, 109, E2415-2423.
- Hoerling, M., Hurrell, J., Eischeid, J. & Phillips, A. (2006). Detection and attribution of twentieth-century northern and southern African rainfall change. *J. Clim.*, 19, 3989-4008.
- Jacob, D. et al. (2014). EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Reg. Environ. Change*, 14, 563-578.
- James, R. & Washington, R. (2013). *Clim. Change*, 117, 859.
- Kling, H., Stanzel, P. & Preishuber, M. (2014). Impact modelling of water resources development and climate scenarios on Zambezi River discharge. *J. Hydrol. Reg. Stud.*, 1, 17-43.
- Klutse, N. A. B. et al. (2018). Potential impact of 1.5°C and 2°C warming on extreme rainfall over West Africa. *Environ. Res. Lett.* (In press).
- Kotlarski, S. et al. (2014). Regional climate modeling on European scales: a joint standard evaluation of the EURO-CORDEX RCM ensemble. *Geosci. Model Dev.*, 7, 1297-1333.

- Magadza, C. H. D. (2010). Indicators of above normal rates of climate change in the Middle Zambezi Valley, Southern Africa Lakes Reservoirs. *Res. Manage.*, 15, 167-192.
- Mapfumo, P., Jalloh, A. & Hachigonta, S. (2014). Review of Research and Policies for Climate Change Adaptation in the Agriculture Sector in Southern Africa. *AfricaInteract*: Enabling research-to-policy dialogue for adaptation to climate change in Africa Working paper 100.
- Morishima, W. & Akasaka, I. (2010). Seasonal trends of rainfall and surface temperature over southern Africa. *Afr. Study Monogr.*, 40, 67-76.
- Ndebele-Murisa, M. R., Mashonjowa, E. & Hill, T. (2011). The implications of a changing climate on the Kapenta fish stocks of Lake Kariba, Zimbabwe. *Trans. R. Soc. South Africa*, 66, 105-119.
- New, M. et al. (2006). Evidence of trends in daily climate extremes over southern and west Africa. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 111, D14.
- Nikulin, G. et al. (2012). Precipitation climatology in an ensemble of CORDEX-Africa regional climate simulations. *J. Clim.*, 25, 6057-6078.
- Nikulin, G. et al. (2018). The effects of 1.5 and 2 degrees of global warming on Africa in the CORDEX ensemble. *Environ. Res. Lett.* (In press).
- Osima, S. et al. (2018). Projected climate over the greater horn of Africa under 1.5°C and 2°C global warming. *Environ. Res. Lett.* (In press).
- Pinto, I., Lennard, C., Tadross, M., Hewitson, B., Dosio, A., Nikulin, G. & Shongwe, M. E. (2016). Evaluation and projections of extreme precipitation over southern Africa from two CORDEX models. *Clim. Change*, 135, 655-668.
- Pokam, M. W. et al. (2018). Consequences of global warming of 1.5°C and 2°C for temperature and precipitation changes over Central Africa. *Environ. Res. Lett.* (In press).
- Pricope, N. G. & Binford, M. W. (2012). A spatio-temporal analysis of fire recurrence and extent for semi-arid savanna ecosystems in southern Africa using moderate-resolution satellite imagery. *J. Environ. Manage.*, 100, 72-85.
- Russo, S., Marchese, A. F., Sillmann, J. & Immé, G. (2016). When will unusual heat waves become normal in a warming Africa? *Environ. Res. Lett.*, 11, 054016.
- SARDC & HBS. (2010). *Responding to Climate Change Impacts*: Adaptation and mitigation strategies as practised in the Zambezi River Basin. Harare and Cape Town: SARDC and HBS.
- Shongwe, M. E., Lennard, C., Liebmann, B., Kalognomou, E., Ntsangwane, L. & Pinto, I. (2014). An evaluation of CORDEX regional climate models in simulating precipitation over Southern Africa. *Atmos. Sci. Lett.*, 16, 199-207.
- Singleton, A. T. & Reason, C. J. C. (2007). Variability in the characteristics of cut-off low pressure systems over subtropical southern Africa. *Int. J. Climatol.*, 27, 295-310.

Tadross, M., Hewitson, B. & Usman, M. (2005). The interannual variability of the onset of the maize growing season over South Africa and Zimbabwe. *J. Climatol.*, 18, 3356-3372.

Taylor, K. E., Stouffer, R. J. & Meehl, G. A. (2012). An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin Amer. Meteorol. Soc.*, 93-4, 485-498.

Tennant, W. (2003). An assessment of intraseasonal variability from 13 year GCM simulations. *Mon. Weather Rev.*, 131, 1975-1991.

Vautard, R. et al. (2013). The simulation of European heat waves from an ensemble of regional climate models within the EURO-CORDEX project. *Clim. Dyn.*, 41, 2555-2575.

Waliser, D. E. & Gautier, C. (1993). A satellite-derived climatology of the ITCZ. *J. Clim.*, 6, 2162-2174.

Weatherly, J. W. & Rosenbaum, M. A. (2017). Future projections of heat and fire-risk indices for the contiguous United States. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 56, 863-876.

FÍSICA DO MACRO E DO MICRO

GASES QUÂNTICOS ULTRAFRIOS: UM BREVE HISTÓRICO COM ÊNFASE NA CONTRIBUIÇÃO BRASILEIRA

ULTRACOLD QUANTUM GASES: A BRIEF SUMMARY FOCUSING ON THE BRAZILIAN CONTRIBUTION

Aristeu R. P. Lima¹

RESUMO

Gases quânticos ultrafrios representam uma área da Física em rápida expansão não apenas no Brasil, mas no mundo inteiro. A versatilidade com que esses sistemas, tanto de natureza bosônica quanto fermiônica, podem ser usados para estudar configurações análogas de outras áreas da Física, como a matéria condensada (sólidos, líquidos, transições de fase clássicas ou quânticas, etc.) ou mesmo de cosmologia e gravitação (buracos negros e supernovas bosônicas, por exemplo), vem atraindo grande interesse da comunidade internacional de físicos, sejam eles experimentais ou teóricos. No presente artigo, vamos delinear algumas das relevantes contribuições brasileiras de que temos notícia. Elas datam desde os primeiros esforços experimentais para a efetiva obtenção em laboratório da condensação e chegam até os dias de hoje, em que vários grupos brasileiros atuam fortemente em diferentes subáreas. Alguns exemplos vão desde o primeiro condensado da América do Sul, obtido no Instituto de Física de São Carlos, da Universidade de São Paulo – fato de fundamental importância para a área no Brasil –, passando pela obtenção experimental da turbulência, também realizada no IFSC/USP, e chegando até temas atuais, como gotículas quânticas e condensados em ambientes de microgravidade, sendo essas últimas realizadas em cooperações que tipicamente envolvem pesquisadores e pesquisadoras oriundos de várias universidades espalhadas pelo país, além de, não raro, envolver pesquisadores internacionais. Em especial, destacaremos as recentes contribuições brasileiras ao estudo de gases ultrafrios que interagem por meio de potenciais do tipo dipolo-dipolo.

Palavras-chave: Condensação de Bose-Einstein, Gases de Fermi, Gases Quânticos Ultrafrios, Interações dipolares.

EXTENDED ABSTRACT

Ultracold quantum gases represent a rapidly expanding area of physics not only in Brazil, but worldwide. The versatility with which these systems, both bosonic and fermionic in nature, can be used to study analogous configurations in other areas of physics such as condensed matter (solids, liquids, classical or quantum phase transitions, etc.), or even cosmology and gravitation

¹ Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, aristeu@unilab.edu.br

(black holes and bosonic supernovae, for example) has attracted great interest from the international community of physicists, and triggered much research effort, from both the experimental and theoretical viewpoints. In this article, we will outline some of the relevant Brazilian contributions that we are aware of. They date from the first experimental efforts to obtain condensation in the laboratory, and continue to this day, in which several Brazilian groups operate strongly in different sub-areas. Some examples range from the first condensate in South America, obtained at the Institute of Physics of São Carlos, of the University of São Paulo (IFSC/USP) – a fact of fundamental importance for the area in Brazil – through the experimental detection of turbulence, also carried out at IFSC/USP, and reaching current topics such as quantum droplets and condensates in microgravity environments, the latter being carried out in collaborations that typically involve researchers from several universities spread across the country and not rarely involves worldwide partnerships. Let us start by discussing the phenomenon itself. According to the accepted definition, Bose-Einstein condensation amounts to the macroscopic occupation of a (usually the lowest) single-particle state. Since we are dealing with bosons (no two fermions would ever occupy the same state), it turns out the condensed atoms act like one giant matter wave, as if they were quantum particles marching in lockstep. This leads to many astonishing properties, which lead to many branches in the field and we will now present a few of the sub-areas mostly studied by Brazilian researchers. Rotating Bose-Einstein condensates exhibit an intriguing phenomenon: the quantization of angular momentum. Thus, unlike a rotating bucket, in which the size of the vortex depends on the speed of its rotation, vortices in condensates maintain their shape as the speed of rotation increases. Thus, to support the increase in angular momentum, new vortices are created that, eventually, can form a pattern, known as Abrikosov's lattice. Understanding how these lattices come about and how they are influenced by interactions, among other characteristics, has been an active research topic in Brazil. As we illustrated above, condensation occurs when there is a macroscopic occupation of the single-particle states. In non-interacting systems or in the ones without strong interaction and at negligible temperature, 100% of the particles are in this state, as predicted by theory. But what happens when interactions become too strong and quantum fluctuations cannot be ignored? It turns out that interactions can kick out particles from the lowest state, thereby generating an energy contribution capable of leading to self-bound quantum droplets. Brazilian researchers have provided useful insights as well as quantitative predictions of this energy contribution. Once the quantum nature of the droplets has been demonstrated, the question arises how they will behave in the presence of vortices. This problem too was studied by Brazilian researchers (or foreign citizens working in Brazil). They found a less promising scenario for the nucleation of vortexes in quantum droplets,

at least in those that are being produced routinely in the laboratory. A further topic concerns the presence of the Earth's gravitational field in cold atomic experiments. Indeed, it does not affect many of the interesting effects observed in cold atom systems. However, since it constitutes a linear potential that singles out a direction of space, its effect cannot be totally ruled out in many of the experiments. For example, when placing a condensate in a spherical trap to study quantum physics in curved spaces, for example, the condensate tends to accumulate in the lower region of the trap. To get around this problem, the North American Space Agency (NASA) recently launched a laboratory of cold atoms, with the objective of carrying out experiments in outer space, that is, in regions where gravity is very small, called microgravity. Also here, we can find the fingerprints of Brazilian science, especially concerning the critical temperature, the low-lying excitations and the ground-state configuration of both dipolar and non-dipolar BECs. Another interesting phenomenon worth mentioning in this context is that of solitary waves. Solitons, as the name implies, are solitary traveling waves with their own characteristics such as permanent shape, location in a defined region, neither dispersed nor obeying the principle of superposition. Due to the fact that the Gross-Pitaevskii equation is non-linear and partial, such solutions are present and have special characteristics, depending on the nature of the condensate. Brazilian researchers have investigated bright and dark solitons in a number of situations, thereby helping to improve the understanding of such systems. One of the most attractive characteristics of ultracold systems is their ability to emulate usual condensed matter systems and optical lattices are a paradigmatic example. The use of counter-propagating lasers leads to the creation of stationary waves in the electromagnetic field. As a consequence, the periodicity of the resulting potential generates the possibility of trapping atoms (bosons and fermions) in lattices, which resemble a solid. Such lattices can be controlled in such a way that atoms perceive more or less trapping potentials. In this way, insulating or Mott states can be obtained, in which the atoms are held fixed in their sites, or superfluid states, in which condensed bosonic atoms are spread throughout the lattice and display phase coherence. Here too, one can find contributions by Brazilian researchers, with emphasis on the effective field theory accounting for this quantum phase transition. As stated later in the text but surely not unknown to the reader, atoms with integer total angular momentum (in units of $\hbar/2\pi$, with Planck's constant \hbar), when adding their nuclear, orbital and spin components, are bosons and obey Bose-Einstein statistics. Atoms with half-integer spin, however, are fermions and obey the Pauli principle in the same way than electrons. This opens up an interesting opportunity to study these systems and investigate their properties of many bodies, such as the Fermi surface and the formation of Cooper pairs, as well as in metals. Moreover, by putting two fermions together one can form a boson, thereby going from a Cooper-pair

like to a BEC-like superfluid state, if the temperature is low enough. Studies of both situations, actually, of the whole transition have been conducted with important participation of Brazilian researchers. Due to the aforementioned Pauli principle, Fermi gases composed of only one spin component cannot directly collide at low temperatures. However, if they have dipole moments, whether electric or magnetic, the anisotropic and long-range dipole-dipole potential allows for interaction between atoms. In this context, both static and dynamic properties of dipolar Fermi gases have been studied with Brazilian participation. As we have seen, relevant as well as broad contributions have been made by Brazilian researchers and institutions. In the course of the years, the perspective of improving both quantitatively and qualitatively the share of the Brazilian science in the advances in the field ultracold quantum gases has been confirmed and this seems to remain so in the future.

Key-words: Bose-Einstein Condensation, Fermi Gases, Ultracold Quantum Gases, Dipolar Interactions.

INTRODUÇÃO

Esta seção fornece uma visão geral sobre a física dos gases quânticos ultrafrios. Aqui vamos discutir em ordem cronológica aproximada os principais avanços experimentais e teóricos que lançaram as bases para o surgimento do campo de pesquisa de átomos e moléculas frios. A partir das descobertas experimentais que desencadearam alguns dos principais desenvolvimentos da física nos últimos 100 anos, apresentamos um relato histórico contendo os conceitos e avanços introduzidos no contexto em que eles estavam envolvidos. É importante ressaltar que as informações que se seguem constam detalhada e contextualizadamente, quando não houver outras referências, na tese de doutorado do autor.

BREVE HISTÓRICO GERAL DE SISTEMAS QUÂNTICOS ULTRAFRIOS

Os fenômenos de baixa temperatura encantaram muitas gerações de físicos e sua história envolve algumas das maiores mentes do século passado. Seu início pode ser marcado pela descoberta da supercondutividade em mercúrio sólido por Heike Kammerlingh Onnes em 1911, apenas três anos depois de começar a realizar experimentos com hélio resfriado. Por esta descoberta, Onnes recebeu o Prêmio Nobel de 1913 em física, um dos vários que a comunidade de física de baixa temperatura viria a receber.

O próximo evento a ser destacado é a previsão de A. Einstein, em 1924, do fenômeno que é agora conhecido como condensação de Bose-Einstein. Satyendra Nath Bose era um talentoso físico indiano que descobriu que partí-

culas quânticas idênticas são indistinguíveis, em oposição a objetos clássicos com trajetórias distintas. Esta foi a parte que faltava do quebra-cabeça que forneceu uma derivação robusta da fórmula de radiação do corpo negro de Planck. Bose escreveu um artigo contendo esta derivação e enviou para Einstein. Reconhecendo sua importância, Einstein traduziu o artigo de Bose para o alemão e endossou sua publicação no prestigiado jornal *Zeitschrift für Physik*. Logo depois disso, generalizando o raciocínio de Bose para o caso de um gás de partículas maciças não interagentes, Einstein percebeu que deve haver uma temperatura crítica T_c , abaixo da qual o número de partículas localizadas no estado fundamental deve ser da ordem do número total de partículas. No começo, poucas pessoas levaram essa ideia a sério e esse fenômeno foi considerado uma patologia exibida pela gás Bose não interagente.

A comunidade da física permaneceu cética em relação à condensação de Bose-Einstein como um fenômeno que poderia ser realizado no mundo real, composto por partículas interagentes. Isso começou a mudar em 1937, com a descoberta da transição lambda para superfluidez do ^4He à temperatura de 2,17 K por P. Kapitza, J. F. Allen e D. Misener. Imediatamente depois disso, F. London apresentou a hipótese de que a superfluidez no hélio líquido deve “ser considerada o fenômeno de condensação das estatísticas de Bose-Einstein, distorcido, é claro, pela presença de forças...”. A hipótese de London apoiou-se, por exemplo, no fato de que a temperatura crítica da condensação de Bose-Einstein para um gás não interativo de átomos de hélio é $T_c = 3,13$ K, notavelmente próximo à temperatura real de transição lambda. Além disso, o isótopo fermiônico, ^3He , não parecia apresentar o mesmo fenômeno. No entanto, deve-se observar que, apesar do grande sucesso, a subsequente teoria do hélio de Landau não mencionou a palavra condensação e que o modelo fenomenológico de Laszlo Tisza de dois fluidos, igualmente bem testado e confirmado por experimentos sobre propriedades de transporte de hélio, parecia não precisar de tal suposição.

Embora outros teóricos tenham levado adiante as consequências da hipótese de London, como R. P. Feynman e T. Matsubara, apenas em 1956 um critério amplamente aceito para a condensação de Bose-Einstein foi formulado. Nesse trabalho, O. Penrose e L. Onsager mostraram que as abordagens teóricas à condensação de Bose-Einstein previamente concebidas, incluindo o famoso artigo de N. N. Bogoliubov, estão todas intimamente relacionadas e possuem o mesmo critério subjacente para esse fenômeno, formulado em termos do surgimento da ordem de longo alcance. Em particular, o artigo de Bogoliubov ficou bem conhecido e as ideias e métodos ali contidos se tornaram o procedimento padrão para estudar efeitos além do campo médio nos condensados de Bose-Einstein.

A próxima contribuição importante para a descrição teórica dos fenômenos de baixa temperatura é a construção do pseudopotencial para as forças

de Van der Waals em 1957, em dois artigos seminais de K. Huang e C. N. Yang e T. D. Lee, Huang e Yang (LHY). A abordagem de pseudopotencial levou a uma simplificação significativa, pois o potencial efetivo a baixas temperaturas é governado por um único parâmetro: o comprimento de espalhamento da onda s , denotado a_s . Esses autores calcularam as correções de interação para a energia no estado fundamental dos gases Bose e Fermi homogêneos diluídos. O impacto do trabalho deles é grande ainda nos dias de hoje, tendo a teoria sido aplicada, por exemplo, a gases não homogêneos de Bose e a gases dipolares. Neste último caso, a presença de flutuações quânticas calculadas pelo método LHY levou à explicação da existência de novos estados da matéria conhecidos como gotículas quânticas.

Nos anos 1950, foi desenvolvida uma teoria que poderia explicar a supercondutividade microscopicamente. O primeiro passo nessa direção foi dado por L. N. Cooper, que mostrou em 1956 que dois elétrons na presença de um mar de Fermi preenchido formará um par, desde que a interação entre eles seja atraente, por mais fraca que ela seja. Com base nessa observação, conhecida como instabilidade de Cooper, J. Bardeen, o próprio Cooper e J. R. Schrieffer (BCS) obtiveram a teoria da supercondutividade. Na teoria BCS, a superfluidez dos elétrons tem sua origem na condensação de Bose-Einstein de pares de Cooper. Por essa contribuição, os três autores receberam o Prêmio Nobel de Física em 1972.

Em 1961, L. Pitaevskii e E. P. Gross derivaram a equação mais importante para a condensação de Bose-Einstein, que recebeu o nome deles. Embora tenha sido inicialmente utilizada para investigar vórtices em gases de Bose, a equação de Gross-Pitaevskii tem sido aplicada desde então a uma ampla gama de fenômenos, especialmente após a realização experimental da condensação de Bose-Einstein em diferentes gases armadilhados, onde a teoria de Gross-Pitaevskii é empregada com mais êxito.

Seguindo o curso da história, nesta breve visão geral sobre física de baixa temperatura, voltamos as atenções a uma grande descoberta experimental que lida com partículas fermiônicas: superfluidez no isótopo fermiônico de hélio, isto é, ^3He . Em 1972, D. Osheroff e colegas estavam realizando experimentos na curva de fusão do hélio fermiônico e descobriram que, à temperatura 2,7 mK, a derivada da pressão em relação à temperatura revelou uma mudança repentina. Evidências mais fortes para a nova fase foram encontradas logo após as medições de ressonância magnética nuclear. No mesmo ano, A. J. Leggett divulgou a natureza BCS da transição no hélio superfluido. Por essa descoberta, D. Lee, Osheroff e R. C. Richardson receberam o Prêmio Nobel de Física em 1996 e Leggett recebeu parte do Prêmio Nobel de 2003 pelos trabalhos teóricos correspondentes a essa explicação.

Embora os fenômenos de baixa temperatura pareçam abundantes e ricos na nova física, como nós acabamos de ver, ainda havia muito por vir,

que dependia do desenvolvimento de técnicas capazes de permitir que fossem atingidas temperaturas ainda mais baixas. Uma dessas técnicas é o método de resfriamento a laser, que foi desenvolvido na década de 1980 pelos esforços combinados de muitos físicos. Particularmente notáveis são as contribuições de C. Cohen-Tannoudji, S. Chu e W. D. Phillips, que foram homenageadas pelo Prêmio Nobel do ano 1997. É difícil superestimar o impacto dessa técnica, pois permitiu pela primeira vez atingir temperaturas na faixa de μK . Na mesma década, um trabalho teórico apareceu, que foi escrito por experimentalistas do Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT). Eles estudaram quantidades como a temperatura crítica para condensação e a fração de condensado no caso de gases ideais armazenados em um potencial externo. Além do fato de que esses resultados foram surpreendentemente confirmados por experimentos posteriores, a importância desse estudo está na orientação que ele forneceu às investigações experimentais que logo depois seriam realizadas.

A corrida pela condensação de Bose-Einstein tornou-se então cada vez mais intensa, impulsionada por muitos desenvolvedores. Um detalhe interessante a ser considerado aqui é que os graus internos de liberdade desempenham um papel decisivo nos esquemas de resfriamento, impactando diretamente no sucesso dos métodos de resfriamento para cada espécie atômica. A corrida foi finalmente vencida em 1995 pelo rubídio, condensado por C. Wieman e E. Cornell na Universidade do Colorado, em Boulder, e pelo sódio, condensado por W. Ketterle no MIT. A realização experimental do fenômeno da condensação, prevista setenta e um anos antes por Einstein, é considerada um dos maiores avanços da física do século passado. Por sua conquista, Wieman, Cornell e Ketterle foram agraciados com o Prêmio Nobel de Física do ano 2001.

O QUE É CONDENSÇÃO DE BOSE-EINSTEIN

Partículas quânticas se dividem em dois grupos quanto à sua estatística: os férmions, que obedecem a distribuição de Fermi-Dirac, e os bósons, que satisfazem a distribuição de Bose-Einstein. De fato, átomos com momento angular total semi-inteiro (em unidades de $\hbar/2\pi$, sendo \hbar a constante de Planck), quando se soma suas componentes nuclear, orbital e de spin, são férmions e obedecem o princípio de Pauli da mesma forma que elétrons. Já átomos com momento angular total inteiro são bósons. Esta conexão é demonstrada pelo teorema spin/estatística, no âmbito da teoria quântica de campos.

Enquanto os férmions satisfazem o princípio de Pauli, vários bósons não apenas podem ocupar o mesmo estado, como tendem a fazê-lo. Conforme a temperatura do sistema é abaixada, partículas bosônicas tendem a ocupar os estados de mais baixa energia. De fato, ao se atingir uma determinada

temperatura, chamada temperatura crítica, o número de partículas que ocupa o estado fundamental se torna comparável ao número total de partículas. De fato, idealmente, à temperatura zero, todas as partículas ocupariam o estado fundamental. Assim, o estado de muitos corpos desse sistema em $T = 0$ é simplesmente a função de onda do estado fundamental, normalizada a N partículas. Em palavras simples, a condensação é a ocupação macroscópica do estado fundamental.

CONTRIBUIÇÕES PRINCIPAIS DO PROF. VANDERLEI SALVADOR BAGNATO E DO IFSC/USP

No Instituto de Física da Universidade de São Paulo, campus de São Carlos, atua o pesquisador Vanderlei Salvador Bagnato, um dos pioneiros e um dos maiores representantes da área de gases quânticos ultrafrios no Brasil. No que se segue, fazemos uma exposição relativamente detalhada da obra referido do professor, dada a sua importância para a difusão da área no Brasil. Iniciamos com um breve resumo de sua trajetória acadêmica, cuja fonte principal é o sítio na internet de seu instituto.

Vanderlei Bagnato, como é mais conhecido, concluiu simultaneamente Bacharelado em Física – USP - e Engenharia de Materiais - UFSCar - em 1981 e realizou o doutorado em Física - Massachusetts Institute of Technology - MIT em 1987. Atualmente é professor titular da Universidade de São Paulo e coordenador da Agência USP de Inovação. Publicou cerca de 500 artigos em periódicos especializados. Possui 24 capítulos de livros e seis livros publicados. Orientou 45 dissertações de mestrado e 36 teses de doutorado, nas áreas de Física, Odontologia e Medicina. Recebeu diversos prêmios e homenagens. Atua na área de Física Atômica e Aplicações da Óptica nas Ciências da Saúde. Trabalha com átomos frios, Condensados de Bose-Einstein e ações fotodinâmicas em câncer e controle microbiológico. É membro da Academia Brasileira de Ciências, The Academy of Sciences for the Developing World, da Academia Pontifícia de Ciências do Vaticano e da National Academy of Sciences (USA). Coordena um Centro de Pesquisa, no qual ciências básicas e aplicadas convivem em harmonia. Realiza diversas atividades de Inovação Tecnológica e difusão de ciências.

Neste currículo impressionante, devemos destacar algumas contribuições especiais. Notadamente, a obtenção das temperaturas críticas de condensados em potenciais externos, tema estudado no MIT durante o seu doutorado, e a realização do primeiro condensado na América do Sul e seu uso para o estudo da turbulência quântica. A seguir, elaboramos algumas dessas ideias e elencamos as dificuldades superadas para sua implementação.

TEMPERATURA CRÍTICA DE UM CONDENSADO EM UM POTENCIAL EXTERNO

Tipicamente, exemplos de condensados em livros texto até os anos 1990 tratavam de condensados homogêneos, confinados em “caixas” de volume fixo. Este paradigma teórico, entretanto, não podia ser realizado à época, pois não se pôde construir um tal recipiente em escala microscópica. Além disso, as modernas técnicas de armazenamento homogêneo ainda demorariam décadas para surgir.

Para contornar esta dificuldade, foram desenvolvidas armadilhas magnéticas, que exploravam a influência de campos magnéticos nos níveis atômicos de energia. Como resultado da não homogeneidade dos campos, os potenciais de aprisionamento resultantes tomavam diferentes formas. Neste contexto, a temperatura crítica, a fração condensada como função da temperatura e o calor específico são grandezas particularmente importantes para revelar a natureza física do gás e guiar as equipes experimentais na busca pelo condensado. E precisamente essas grandezas foram estudadas por Vanderlei Bagnato, David Pritchard e Daniel Kleppner em 1987, em uma publicação que conta mais de quatrocentas citações.

PRIMEIRO CONDENSADO DA AMÉRICA DO SUL E TURBULÊNCIA QUÂNTICA

Ao retornar ao Brasil, após concluir seu doutorado no MIT, o Prof. Vanderlei passa a integrar os quadros do IFSC/USP de São Carlos, sendo uma das forças motrizes daquela instituição. Hoje, o IFSC é o lugar de maior destaque em pesquisa sobre átomos frios no Brasil. Lá são produzidos e estudados condensados de rubídio, de sódio e de potássio, enquanto um condensado de disprósio se encontra em fase de preparação.

O condensado de ^{87}Rb foi o primeiro condensado da América do Sul, publicado por Henn et al. (2008), e abriu as portas para a pesquisa experimental em condensados no Brasil. Neste trabalho, um complicado aparato ótico foi utilizado para observar inequivocamente a condensação por meio de características puramente quânticas, tais como a mudança na geometria da nuvem condensada após o desligamento da armadilha. A nuvem térmica, que se comporta classicamente, tende a se tornar esférica conforme as partículas são liberadas e se afastam do centro da armadilha. A nuvem condensada, por outro lado, sai de uma configuração alongada em um determinado eixo da armadilha para uma em que a nuvem se alonga na direção perpendicular. Tal comportamento permitiu o estudo de grandezas como a fração condensada, bem como da dependência do número total de partículas na temperatura do sistema.

Realizado o primeiro condensado, estava aberto o caminho para outros avanços relevantes. Já no ano seguinte, 2009, foi obtido um estado caracterizado como sendo turbulento, mas que não podia ser explicado pela física clássica (Henn et al., 2009). Tal realização foi reconhecida com uma publicação na prestigiosa revista *Physical Review Letters*, da Sociedade Americana de Física, e foi destacada e premiada em vários outros contextos. Como exemplo, o Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF) considerou que o artigo “demonstrou pela primeira vez o fenômeno de turbulência em um condensado Bose-Einstein e revelou as condições em que tal turbulência pode ser investigada e possivelmente controlada”, o que garantiu ao Prof. Vanderlei o prêmio CBPF de Física em 2010.

FORMAÇÃO DE PESQUISADORES

Para além de toda a pesquisa científica – cerca de 10 publicações anuais em revistas de alto impacto apenas na área de física atômica –, o IFSC/USP tem importante contribuição na formação de pesquisadores. Atualmente, o instituto conta com dezenas de pesquisadores nos níveis de iniciação científica, mestrado, doutorado e pós-doutorado, além de pesquisadores fixos nos quadros docente e técnico.

CONTRIBUIÇÕES DE DEMAIS GRUPOS POR ÁREA DE PESQUISA

De uma maneira geral, podemos afirmar que a pesquisa em átomos frios é bastante difundida no Brasil, tendo grupos atuando nos estados do Ceará, Pernambuco, Rio de Janeiro, Rio Grande do Norte e São Paulo. A seguir, destacamos alguns dos grupos de pesquisa espalhados pelo Brasil, com foco em seus temas de pesquisa mais recorrentes. Ressalvamos aqui a absoluta impossibilidade de se listar todos os pesquisadores ou mesmo todos os grupos. Pedimos desculpas antecipadamente pelas eventuais omissões, ainda que inadvertidas.

VÓRTICES EM CONDENSADOS DE BOSE-EINSTEIN

Condensados de Bose-Einstein postos em rotação exibem um fenômeno intrigante: a quantização do momento angular. Assim, diferentemente de um balde girante, em que o tamanho do vórtice depende da velocidade de sua rotação, vórtices em condensados mantêm a sua forma conforme a velocidade de rotação aumenta. Assim, para comportar o aumento de momento angular, são criados novos vórtices que, eventualmente, podem formar uma rede, conhecida como rede de Abrikosov.

Neste campo de pesquisa se destacam os grupos dos Profs. Arnaldo Gammal (<http://axpfep1.if.usp.br/~gammal/>), da Universidade de São Paulo, campus da capital, e Sadhan Adhikari (<https://professores.ift.unesp.br/sk.adhikari/>), do Instituto de Física da Universidade Estadual de São Paulo. Com o apoio de seus grupos de pesquisa, eles estudaram várias propriedades de sistemas de vórtices e as redes que eles formam.

Em nosso grupo de pesquisa, na Unilab, também realizamos investigações a respeito de vórtices, notadamente no que concerne à interação entre eles e a influência que ela tem na formação da rede de Abrikosov no estudo de Dantas et al. (2015).

FLUTUAÇÕES E GOTÍCULAS QUÂNTICAS

Conforme ilustramos acima, a condensação ocorre quando há a ocupação macroscópica dos estados de uma partícula. Em sistemas sem interação forte e a uma temperatura desprezível, 100% das partículas se encontram neste estado. Mas o que acontece quando as interações se tornam fortes demais e as flutuações quânticas não podem ser ignoradas?

Durante seu doutorado, o presente autor determinou quantitativamente o efeito na energia causado por essas flutuações. Posteriormente, mostrou-se que elas são responsáveis pela criação de um novo estado da matéria constituído de gotículas autoaprisionadas, que se assemelham a um líquido, exceto pelo fato de serem forças quânticas a lhes manterem ligadas e não clássicas, como nos líquidos comuns.

Relevantes contribuições nessa área foram dadas pelo grupo do Prof. Adhikari, que estudou, entre outros tópicos, as limitações das flutuações quânticas de Lee-Huang-Yang na formação de gotículas quânticas no artigo produzido por Gautam e Adhikari (2019).

VÓRTICES EM GOTÍCULAS QUÂNTICAS

Uma vez demonstrada a natureza quântica das gotículas, surge a pergunta de como elas se comportarão na presença de vórtices. Este problema foi estudado em conjunto pelos Profs. Ednilson Alves dos Santos, da Universidade Federal de São Carlos, Emanuel Henn, da USP de São Carlos, e Tommaso Macrí, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Eles encontraram um cenário pouco promissor para a nucleação de vórtices em gotículas quânticas, pelo menos naquelas que vêm sendo produzidas corriqueiramente em laboratório. Entretanto, conforme o estudo de Cidrim et al. (2018), algumas possibilidades se mantêm promissoras, tais como correções quânticas de longo alcance, que podem vir a mudar o cenário, como também o uso de novos átomos ou moléculas em que os vórtices possam ser mais estáveis.

CONDENSADOS EM ARMADILHAS ESFÉRICAS

A presença do campo gravitacional terrestre não afeta muitos dos efeitos interessantes observados em sistemas de átomos frios. Entretanto, uma vez que constitui um potencial linear que singulariza uma direção do espaço, seu efeito não pode ser totalmente descartado em muitos dos experimentos. Por exemplo, ao colocar um condensado em uma armadilha esférica para, por exemplo, estudar física quântica em espaços curvos, o condensado tende a se acumular na região inferior da armadilha. Para contornar esse problema, recentemente a Agência Espacial Norte-Americana (NASA, da sigla em inglês) lançou um laboratório de átomos frios com o objetivo de realizar experimentos no espaço sideral, ou seja, em regiões onde a gravidade é muito pequena, chamada de microgravidade.

Até o momento, alguns estudos envolvendo pesquisadores brasileiros têm sido feitos sobre o tema. Eles estão instalados no IFSC/USP de São Carlos, na Unilab e na UFSCAR e podem ser encontrados nas referências Bereta et al. (2019), Moeller et al. (2020) e Diniz et al. (2019).

Em especial, destacamos a investigação que envolve interações anisotrópicas e de longo alcance, conhecidas como dipolo-dipolo, que envolve o presente autor em parceria com o grupo do Prof. Emanuel Henn. Nela, Diniz et al. (2019) executam a primeira investigação do tema no mundo inteiro, tendo sido publicada na revista *Scientific Reports*, do grupo Nature.

SÓLITONS

Sólitons, como o nome indica, são ondas viajantes solitárias com características próprias, tais como forma permanente, localização em região definida, não se dispersa nem obedece o princípio da superposição. Devido ao fato de a equação de Gross-Pitaevskii ser não linear e parcial, tais soluções estão presentes e apresentam características especiais, dependendo da natureza do condensado. Neste contexto, destaca-se o trabalho do Prof. Sadhan Adhikari, do IFT/UNESP (<https://professores.ift.unesp.br/sk.adhikari/>). Entre outras contribuições, ele tem estudado sólitons brilhantes (crista) e escuros (vale) em BECs com e sem acoplamento spin-órbita, em redes óticas, em núcleos de vórtices, em condensados dipolares e não dipolares.

REDES ÓTICAS

Uma das importantes características de sistemas ultrafrios é a capacidade de emular sistemas usuais de matérias condensadas e as redes óticas são um exemplo paradigmático disso. O uso de lasers que se propagam em sentidos opostos leva à criação de ondas estacionárias no campo eletromag-

nético. Como consequência, a periodicidade do potencial resultante gera a possibilidade de aprisionamento de átomos (bósons e férmions) em redes, que se assemelham a um sólido. Tais redes podem ser controladas de forma que os átomos percebam potenciais mais ou menos aprisionantes. Dessa forma, podem ser obtidos estados isolantes, ou de Mott, em que os átomos se encontram presos em seus sítios, ou estados superfluidos, em que átomos bosônicos condensados se encontram espalhados por toda a rede e apresentam coerência de fase.

O estudo da transição quântica entre as fases de Mott e superfluida atraiu a atenção de muitos pesquisadores teóricos e experimentais. Foi neste contexto que o pesquisador brasileiro e professor da Universidade Federal de São Carlos Francisco Ednilson Alves dos Santos (<https://www.df.ufscar.br/santos>) teve a oportunidade de contribuir de forma relevante para o estudo de átomos frios ao desenvolver, durante seu doutoramento, uma teoria de campo efetiva para descrever a transição entre esses estados no caso geral, em que o sistema apresenta n átomos por sítio. A precisão e a abrangência desta teoria podem ser exemplificadas pelos fatos de que poderosos cálculos simulacionais desenvolvidos usando a técnica de Monte Carlo, além de não poderem ser usados para $n > 1$, tinham barras de erro muito maiores do que a incerteza oriunda da teoria efetiva.

Com base na teoria efetiva para a transição Mott/superfluido, o Prof. Ednilson Santos desenvolveu outros estudos de gases de Bose em redes óticas, notadamente a respeito do espectro de excitações.

GASES DE FERMI

Como dito anteriormente, átomos com momento angular total semi-inteiro (em unidades de $\hbar/2\pi$, sendo \hbar a constante de Planck), quando se soma suas componentes nuclear, orbital e de spin, são férmions e obedecem o princípio de Pauli da mesma forma que elétrons. Isto abre a interessante oportunidade de se estudar esses sistemas e investigar as propriedades de muitos corpos, tais como a superfície de Fermi e a formação de pares de Cooper, assim como em metais.

Nessa área, o Prof. Heron Carlos de Godoy Caldas (https://ufsj.edu.br/dcnat/heron_c_g_caldas.php), da Universidade Federal de São João del-Rei, tem contribuições relevantes. Como exemplos, podemos citar os seus estudos envolvendo superfluidos fermiônicos, estados de Fulde-Ferrel-Larkin-Ovchinnikov, gases de Fermi a temperatura finita além de campo médio, entre outros.

BCS-BEC CROSSOVER

Em um sistema fermiônico com uma leve interação atrativa, a redução da temperatura leva à formação de pares de Cooper, compostos por dois átomos. Como consequência, o par tem momento angular total inteiro, ou seja, é um bóson. Por meio de um mecanismo conhecido como ressonância de Feshbach, pode-se fazer com que átomos variem entre o estado superfluido de Cooper, que pode ser entendido por meio da teoria BCS da supercondutividade, até um estado molecular, em que cada par é visto como um único constituinte que obedece a estatística de Bose. Neste último caso, as propriedades do sistema são explicadas pela condensação das moléculas. Já a transição entre os dois estados é conhecida como BCS-BEC crossover.

Para entender essa transição, é preciso levar flutuações quânticas em consideração no âmbito da teoria de Ginzburg-Landau dependente do tempo. Neste contexto, o pesquisador brasileiro Carlos Sá de Melo (<https://www.physics.gatech.edu/user/carlos-sa-de-melo>), da Georgia Tech University - EUA, em conjunto com Mohit Randeria e Jan Engelbrecht, obteve um resultado muito importante, ao demonstrar pela primeira vez a existência do crossover. Para se ter ideia da importância do resultado, o estudo de Sá de Melo et al. já atingiu mais de 500 (quinhentas) citações em publicações indexadas.

O Prof. Sá de Melo, desde então, construiu uma sólida carreira, na qual tem investigado vórtices e antivórtices, estados topológicos, magnetismo, transições quânticas de fase e muitos outros aspectos interessantes de gases quânticos ultrafrios.

GASES DE FERMI DIPOLARES

Por conta do referido princípio de Pauli, gases de Fermi compostos por apenas uma componente de spin não podem colidir diretamente a baixas temperaturas. Entretanto, se possuírem momentos de dipolo, sejam eles elétricos ou magnéticos, o potencial anisotrópico e de longo alcance de dipolo-dipolo permite a interação entre os átomos. Neste contexto, no âmbito da pesquisa de doutorado do presente autor, foram estudados gases de Fermi dipolares.

Por meio de uma aproximação usada mais frequentemente em física nuclear, foi possível a construção de uma teoria hidrodinâmica para gases de Fermi dipolares armazenados em um potencial harmônico. Tal teoria foi utilizada para estudar a configuração de equilíbrio, bem como as excitações de baixa energia e a dinâmica de tempo de voo desses sistemas.

CONCLUSÃO

Neste trabalho, apresentamos uma visão ampla sobre as contribuições dadas por físicos e instituições brasileiras à pesquisa com gases quânticos ultrafrios. Após uma contextualização sobre as descobertas mais importantes envolvendo sistemas em baixas temperaturas, algumas das principais áreas de pesquisa desenvolvidas no Brasil, bem como os pesquisadores correspondentes, foram elencadas. Para além disto, junto com as definições e contextos mais relevantes, mostramos também alguns dos resultados obtidos.

De forma geral, pudemos constatar que a participação brasileira, tanto teórica quanto experimental, nas mais diversas subáreas de pesquisa em gases quânticos ultrafrios tem aumentado tanto em volume quanto em relevância. Ao mesmo tempo em que há pesquisadores brasileiros em todos os níveis atuando em instituições espalhadas pelo Brasil e pelo mundo, as novas gerações parecem consolidar a contribuição brasileira para os estudos de gases quânticos ultrafrios.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico por meio do projeto Nº BP3-0139-00281.01.00/18 pelo apoio indispensável para a participação na 3ª Conferência de Física de Países de Língua Portuguesa.

REFERÊNCIAS

- Bereta, S. J., Madeira, L., Bagnato, V. S. & Caracanhas, M. A. (2019). Bose-Einstein condensation in spherically symmetric traps. *American Journal of Physics*, 87, 924-934.
- Cidrim, A., dos Santos, F. E. A., Henn, E. A. L. & Macrì, T. (2018). Vortices in self-bound dipolar droplets. *Physical Review A*, 98, 023618.
- Dantas, D. S., Lima, A. R. P., Chaves, A., Almeida, C. A. S., Farias, G. A. & Milosevic, M. V. (2015). Bound vortex states and exotic lattices in multicomponent Bose-Einstein condensates: The role of vortex-vortex interaction. *Physical Review A*, 91, 023630.
- Diniz, P. C., Oliveira, E. A. B., Lima, A. R. P. & Henn, E. A. L. (2019). Ground state and collective excitations of a dipolar Bose-Einstein condensate in a bubble trap. *Scientific Reports*, 10, 4831.
- Gautam, S. & Adhikari, S. K. (2019). Limitation of the Lee-Huang-Yang interaction in forming a self-bound state in Bose-Einstein condensates. *Annals of Physics*, 409, 167917.

- Henn, E. A. L., Seman, J. A., Seco, G. B., Olimpio, E. P., Castilho, P., Magalhães, D. V., Magalhães, K. M. F. & Bagnato, V. S. (2008). Bose-Einstein Condensation in ^{87}Rb : Characterization of the Brazilian Experiment. *Brazilian Journal of Physics*, 38, 279-286.
- Henn, E. A. L., Seman, J. A., Roati, G., Magalhães, K. M. F. & Bagnato, V. S. (2009). Emergence of Turbulence in an Oscillating Bose-Einstein Condensate. *Physical Review Letters*, 103, 045301.
- Lima, A. R. P. (2011). *Hydrodynamic Studies of Dipolar Quantum Gases*. [Unpublished PhD Thesis]. Free University of Berlin. Emergence of Turbulence in an Oscillating Bose-Einstein Condensate.
- Mitchell, J. A. (2017). Citation: Why is it so important. *Mendeley Journal*, 67(2), 81-95.
- Móller, N. S.; dos Santos, F. E. A., Bagnato, V. S. & Pelster, A. (2020). Bose-Einstein Condensation on Curved Manifolds. *arXiv*: 2001.07443.
- Sá de Melo, C. A. R., Randeria, M. & Engelbrecht, J. R. (1993). Crossover from BCS to Bose superconductivity: Transition temperature and time-dependent Ginzburg-Landau theory. *Physical Review Letters*, 71, 3202.

ALGUNS ASPECTOS BÁSICOS CIENTÍFICOS E TECNOLÓGICOS DE SISTEMAS NANOSCÓPICOS

SOME BASIC SCIENTIFIC AND TECHNOLOGICAL ASPECTS OF NANOSCOPIC SYSTEMS

Marcos G. E. da Luz¹
Marcos A. Pimenta²

RESUMO

Nesta revisão, primeiro discutimos alguns aspectos físicos essenciais que regem os fenômenos ocorrendo em escala nanométrica. Fazemos um pequeno apanhado de certos efeitos quânticos relevantes e como os mesmos determinam características básicas dos sistemas nanoscópicos. Segundo, consideramos como as qualidades únicas de nanosistemas podem ser empregadas em diversas aplicações. Em especial ressaltamos usos, tais como em microeletrônica e ciências da informação. Também abordamos a relevância dos nanocompósitos em diferentes áreas tecnológicas e a grande diversidade de propriedades e utilização de nanotubos de carbono.

Palavras-chave: Nanosistemas, Nanotecnologia, Efeitos quânticos, Nanopartículas, Nanocompósitos, Nanotubos de carbono.

ABSTRACT

In the present review we first discuss some physical aspects which are essential in determining the phenomenology occurring at the nanometer scale. We survey a small number of relevant quantum effects, connecting them with the basic characteristics of nanoscopic systems. Second, we consider how the unique features of nanosystems can be employed in different applications. In particular, we emphasizes usages such as in microelectronics and information science. Also, we address the importance of nanocomposites in distinct technological areas as well as the great diversity of properties and utilization of Carbon nanotubes.

Key-words: Nanosystems, Nanotechnology, Quantum effects, Nanoparticles, Nanocomposites, Carbon nanotubes.

¹ Departamento de Física – UFPR, Curitiba-PR, Brasil, luz@fisica.ufpr.br

² Departamento de Física – UFMG, Belo Horizonte-PR, Brasil, mpimenta@fisica.ufmg.br

INTRODUÇÃO

Nano é uma expressão usada em ciência para designar 10^{-9} , ou seja, uma parte em um bilhão. Assim, um nanômetro (1 nm) significa um bilionésimo de um metro. Nanociência tenta entender o comportamento de sistemas nesta escala espacial (ver próximas seções), ao passo que nanotecnologia corresponde à aplicação tecnológica de objetos, materiais e dispositivos que tenham dimensões típicas entre 1 e 100 nm e cujas funcionalidades dependam explicitamente da fenomenologia oriunda destas dimensões.

Uma óbvia motivação para se desenvolver objetos nanométricos está associada à mera diminuição do tamanho do objeto ou do dispositivo, otimizando a utilização de espaço. Por exemplo, quanto menor for o tamanho de um transistor, maior será o número de transistores em um *chip* processador e, portanto, maior será a eficiência do processador. Há também a questão fundamental de economia de energia, uma vez que usualmente o consumo de um dispositivo depende de seu tamanho.

No entanto, o grande estímulo à nanotecnologia reside no fato de que novas propriedades físicas e químicas naturalmente emergem em nanomateriais, sendo bastante distintas daquelas que ocorrem nos mesmos materiais, mas em escalas macroscópicas. A nanotecnologia tenta assim se aproveitar destes novos comportamentos advindos do “reino” nano, enfocando as mais diversas aplicações tecnológicas.

Historicamente, os seres humanos vêm usando as chamadas nanopartículas desde a antiguidade (presentes em tintas, vidros coloridos, ligas metálicas, etc.), como o aço Wootz, originário do Sul da Índia, século VI a.C. (Figura 1), ou a cerâmica “brilhante”, criada por volta do século VII d.C., com o nascimento da cultura islâmica. Entretanto, o interesse explícito no estudo e desenvolvimento de nanosistemas é muito mais recente, justamente quando a ciência passa a entender melhor o mundo microscópico quântico. Um passo fundamental nesta direção deu-se com uma palestra proferida em 1959 pelo físico norte-americano Richard P. Feynman (Nobel em Física, 1965): “Há muito espaço lá embaixo”. Hoje em dia é considerada o marco inicial do desenvolvimento da nanotecnologia. Nesta palestra, Feynman previu que o homem, num futuro não muito longínquo, conseguiria manipular a matéria no nível atômico e construir dispositivos constituídos de poucos átomos. Esta previsão começou a tornar-se realidade por volta de vinte anos depois, no início da década de 1980, com o desenvolvimento dos chamados microscópios de varredura por sonda, onde é possível “visualizar” os átomos que constituem um material, possibilitando observar imagens detalhadas de objetos de dimensões nanométricas. Foram também desenvolvidos nestes últimos 25 anos microscópios eletrônicos de alta resolução, que usam feixes de elétrons ao invés de luz, igualmente permitindo a observação dos átomos e de detalhes em escala nanométrica.

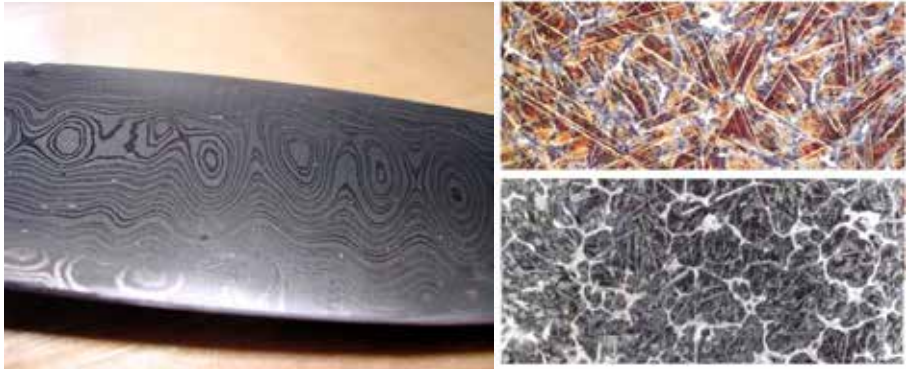


FIGURA 1. Esquerda, uma lâmina moderna com os padrões típicos de aço Wootz. Direita, magnificação (200x) de aço Wootz (composição de 1% a 1.2% de carbono, onde observa-se cementite (carboneto de ferro) na forma de agulhas. Exemplar antigo (sem data definida) vindo da região de Deccan (Índia).

FONTE: David Scott, *Metallography and Microstructure of Ancient and Historic Metals* (The J. Paul Getty Trust – Archetype Books, Singapore, 1991).

A alteração das propriedades de um material nanométrico se deve principalmente à forte manifestação de efeitos quânticos (mas, como veremos a seguir, de uma forma bastante particular) e à enorme relevância de efeitos de superfície. Por exemplo, o chamado confinamento quântico dos elétrons, que se dá em tais sistemas, provoca a alteração de diferentes características físicas dos nanomateriais, como, por exemplo, nas suas estruturas eletrônicas e respostas ópticas. Por outro lado, quanto menor for o objeto, maior será a importância relativa dos átomos que estão na superfície, tendo um papel diferenciado em relação aos átomos do interior. De fato, os átomos superficiais interagem diretamente com o meio no qual o material está inserido, participando assim das reações químicas, como oxidação e catálise, e de processos de transporte e troca, como o de calor.

A seguir iremos, de forma bastante elementar, discutir alguns aspectos-chave da Mecânica Quântica que explicam a enorme diversidade de comportamentos de processos em escala nano. Igualmente, destacaremos as principais características dos nanosistemas que os tornam diferentes de dois limites extremos, um envolvendo poucos átomos, mundo molecular, e outro em escala macroscópica, ou seja, correspondente ao mundo usual à nossa volta. Por último, ilustraremos algumas das grandes potencialidades na utilização de nanomateriais nas mais diversas aplicações científicas-tecnológicas.

MECÂNICA QUÂNTICA: “DOIS DEDOS DE PROSA³”

Apesar de alguns de seus aspectos básicos poderem ser descritos razoavelmente bem pelo que convencionamos chamar de Física Clássica – especialmente quando o meio material em questão pode efetivamente ser pensado como um contínuo ao invés de uma estrutura constituída por átomos e moléculas –, de fato a formação e a agregação da matéria são regidas pelas regras da Mecânica Quântica (MQ). Obviamente que isto leva a processos e fenômenos totalmente distintos do que poderíamos esperar de nosso senso comum “macroscópico”, isto é, envolvendo escalas típicas de nosso dia a dia. Apenas para que as coisas fiquem melhor delineadas nas discussões a seguir, mas não sendo uma definição rigorosa, iremos assumir que macroscópico corresponde a dimensões superiores a décimo de milímetro.

Como já bem difundido (até mesmo no imaginário popular), a MQ foge muito de nossa concepção intuitiva do funcionamento da natureza. Uma de suas mais marcantes características, senão a maior, é que o conceito *estrito* de posição \mathbf{r} e momento $\mathbf{p} = m \mathbf{v}$ (com m a massa e \mathbf{v} a velocidade de uma partícula) perde o sentido no mundo atômico. O que queremos dizer com isto é que a dinâmica de uma partícula quântica, digamos um elétron, não pode ser descrita por uma trajetória bem delineada. Conseguimos apenas determinar probabilidades de onde um elétron pode estar no espaço, bem como probabilidades de qual é sua velocidade: se de alguma forma soubermos uma destas variáveis com alta precisão, perderemos informação sobre o valor da outra. Na verdade, um princípio fundamental do mundo quântico é o princípio da incerteza de Heisenberg (Werner Heisenberg, físico alemão e prêmio Nobel de Física, 1932). Tal princípio diz que certos pares de quantidades relevantes para descrever um sistema (chamadas de observáveis canonicamente conjugadas) não podem ser simultaneamente conhecidos com 100% de certeza. Isto é justamente o caso de posição e momento. Na verdade, tal restrição é bastante abrangente, por exemplo, igualmente válida para os componentes de spin \mathbf{S} de uma partícula – outra propriedade exclusivamente quântica, uma espécie de momento de dipolo intrínseco –, onde se sabemos qual é o valor da componente z deste vetor, não podemos dizer com certeza qual é o valor das componentes x e y .

Quando falamos de sistemas físicos, um jargão muito usado é o de *estado*. Simplificando um pouco seu significado, um estado físico compreende o conjunto de variáveis relevantes para descrever um dado sistema e a maneira como tais variáveis se correlacionam. Fundamental é saber como estas variáveis mudam no tempo em decorrência de interações (internas e externas) às

³ No português coloquial brasileiro, tal expressão significa uma conversa curta e informal entre amigos.

quais o sistema está submetido. Em outras palavras, queremos determinar a dinâmica temporal do sistema, isto é, a evolução de seu estado. No caso da MQ (não relativística), a lei fundamental que rege tal evolução é codificada na famosa equação de Schrödinger (Erwin R. J. A. Schrödinger, físico austríaco e prêmio Nobel de Física, 1933) aplicada ao estado quântico Ψ . Na verdade, a função Ψ é conhecida como função de onda, descrevendo todas as propriedades do problema, entretanto, dadas em termos de probabilidades (ver abaixo). Uma particularidade técnica, mas que tem consequências muito importantes no comportamento de sistemas quânticos, é que não é propriamente Ψ que fornece as referidas probabilidades (ou, de forma mais rigorosa, amplitudes de probabilidade), mas sim seu módulo quadrado $|\Psi|^2$. Este fato dá origem a um fenômeno fundamental em MQ, as interferências quânticas.

Essencial é o fato de que a equação de Schrödinger tem estrutura semelhante a uma equação de onda. Como consequência, Ψ representa uma espécie de “onda de probabilidades” (observamos que aqui estamos abrindo mão de um maior rigor formal, o que se justifica em nossa tentativa de maior clareza e simplicidade conceitual). Assim, em várias situações, as soluções da equação de Schrödinger resultam em “ondas oscilantes” com modos de vibração específicas. Uma analogia interessante pode ser feita com instrumentos musicais, cujas notas fundamentais (com frequências bem determinadas) correspondem aos modos naturais de vibração mecânica dos mesmos. Desta forma, ao resolvermos a equação de Schrödinger, digamos para um elétron sob a atração Coulombiana de um próton, encontramos os estados (ou modos) possíveis descritos nos quais o elétron pode se ligar ao núcleo atrator (o próton). Cada um destes modos está associado a uma energia bem determinada para o elétron na formação do átomo de hidrogênio. É este tipo de descrição matemática que explica a quantização dos níveis de energia em sistemas microscópicos (outra relevante assinatura da MQ), justamente o caso de átomos e moléculas.

Tais modos discretos estão associados a grande parte dos fenômenos quânticos, ou seja, não apenas restritos a estados de ligação eletrônica. Por exemplo, átomos ou moléculas formando uma rede podem vibrar. Essas vibrações, que precisam obedecer às regras da MQ, são então quantizadas. O espectro de frequências dos modos normais de oscilação resultante (conhecidos como modos de fônons), determinam assim relevantes aspectos das propriedades mecânicas e térmicas da rede. Mas é necessário enfatizar que para haver quantização, o sistema precisa estar ligado ou confiando, em outras palavras, estar limitado a uma ou ser fortemente atraído para uma certa região do espaço. Por exemplo, a técnica de espalhamento de elétrons (livres) por moléculas, utilizada para se inferir propriedades das últimas, tipicamente resulta em um espectro contínuo de energia dos elétrons espalhados.

Dado o exposto acima, em MQ ocorre um efeito que na verdade é universal na natureza, válido para qualquer processo oscilatório confinado. Novamente, instrumentos musicais são uma boa ilustração para o fenômeno. Os instrumentos são constituídos por um corpo material que, uma vez perturbado por uma força externa, coloca-se em vibração mecânica (resultando no som). Os modos fundamentais, frequências específicas geradas, são desta forma uma consequência direta do fato de que as dimensões do meio onde ocorrem as vibrações são limitadas – as cordas de um piano, os tubos de um órgão, etc. Assim, as vibrações têm comprimentos de onda λ que dependem diretamente do tamanho L do corpo do instrumento, maiores L 's levam a maiores λ 's. Como a frequência angular ω é inversamente proporcional a λ , o espectro de frequências também é função das dimensões físicas do instrumento musical. Desta forma, tamanho bem como formato de um objeto vão determinar seu conjunto característico de ω 's.

De forma geral em MQ vale a relação de Planck (Max K. E. L. Planck, físico alemão e prêmio Nobel de Física, 1918) que liga diretamente uma frequência típica ω com sua energia correspondente, ou seja $E = \hbar \omega$ para $\hbar = 1,054571... \times 10^{-34}$ J.s a constante de Planck dividida por 2π (mais geralmente temos $E_n = n \hbar \omega$, $n = 1, 2, 3, \dots$, que são as energias relacionadas aos “harmônicos” de ω ; mas não entraremos em tais detalhes aqui). O importante é que as frequências e energias quantizadas de um sistema físico dependem de seu tamanho L . Assim, comprimentos característicos maiores (menores) tipicamente correspondem a energias menores (maiores). Por exemplo, o átomo de hidrogênio, com diâmetro de 0.11 nm, precisa de uma energia de 13,6 eV para sua ionização a partir do estado fundamental (ver a seguir). Já energias associadas a fônons (novamente, os modos normais de oscilação de átomos em uma rede) têm espectro na faixa de meV (10^{-3} eV). Fundamental mencionar que valores de frequências não determinam apenas ranges de energia. Especificam também toda uma gama de fenômenos diretamente associados com os intervalos concretos para os λ 's. Como um paralelo, relembramos a distinção entre óptica física e óptica geométrica, com fenomenologias bastante distintas advindas justamente da comparação entre os λ 's típicos da luz envolvida com as dimensões do objeto com os quais as ondas interagem.

Um último ponto que desejamos destacar sobre MQ diz respeito ao número de constituintes de um sistema. Para tal, começamos com o átomo mais simples da natureza, o hidrogênio. As energias possíveis do elétron são discretas e dadas por $E_n = -E_0/n^2$, com $E_0 \approx 13,6$ eV e $n = 1, 2, 3, \dots$. Para $n = 1$ temos o estado fundamental (o nível mais baixo de energia), implicando que, para desfazer o átomo de hidrogênio nesta situação, precisamos fornecer uma energia de no mínimo 13,6 eV ao elétron. Na mesma direção, o átomo quando excitado assume valores maiores para o número quântico n . Para $n \rightarrow \infty$, temos a energia de ligação indo a zero e, portanto, o sistema tende

a se “desligar”. Note também que a degenerescência do sistema (número de estados distintos tendo uma mesma energia) para o nível n é n^2 .

Para todos os outros átomos da Tabela Periódica – em uma escala crescente de número de elétrons (bem como de prótons e nêutrons no núcleo atômico) –, a dinâmica torna-se muito mais rica, com os elétrons também interagindo entre si. Logo, não existe uma solução analítica exata para a equação de Schrödinger e não temos uma expressão tão simples para descrever os estados energéticos e os números quânticos de átomos multieletrônicos (mencionamos, entretanto, que algumas regras muito úteis existem, como as de Hund – Friedrich Hund, físico alemão –, porém aplicáveis apenas para configurações particulares). É intuitivo pensar então que esta complexidade surge justamente pelo aumento do número de constituintes (aqui partículas elementares) formando o sistema. Logo, a descrição matemática irá igualmente ser mais laboriosa. Isto, entretanto, não é uma especificidade apenas da MQ. A Mecânica Clássica tende a apresentar uma descrição muito mais complicada à medida que aumentamos o número de partículas interagentes. Porém, aqui há uma diferença conceitual bastante relevante. Pelo caráter ondulatório da MQ, as interações entre todos os constituintes vão gerar uma enorme proliferação de componentes oscilatórios, contribuindo para a função de onda total Ψ do problema (isto devido ao princípio da superposição, válido para qualquer equação de onda linear, como é o caso da equação de Schrödinger). Como consequência, temos um processo similar às interferências construtivas e destrutivas observadas em ondas clássicas, fortemente dependentes do número N de elementos no sistema.

Desta forma, os padrões resultantes para a função de onda quântica Ψ vão ser bastante distintos em função do número N de constituintes do sistema. Entretanto, algo um pouco contraintuitivo pode acontecer. Poderíamos esperar que se temos poucos elementos o padrão tenderá a ser mais simples, complicando progressivamente à medida que N cresce. Mas isto nem sempre é assim. Considere, por exemplo, um fenômeno óptico, com o padrão de máximos e mínimos de interferência observado num anteparo para uma luz monocromática que passa por uma rede de difração contendo $N=2$, $N=9$ e $N \rightarrow \infty$ fendas estreitas. Na Figura 2 mostramos o resultado de cálculos teóricos para tal efeito. Claramente o caso de $N=2$ e (talvez surpreendentemente) o caso de infinitas fendas (na verdade, podemos considerar um número muito grande, digamos $N=20.000$, de fendas já tendo um comportamento muito semelhante ao limite matemático de $N \rightarrow \infty$) apresentam padrões relativamente simples de intensidade de luz chegando no anteparo. Bastante mais elaborado é o caso de N “intermediário” (no presente exemplo já correspondendo a $N=9$) que, além dos máximos principais, desenvolve estruturas secundárias bastante ricas (ver detalhes na Figura 2). Esta é uma clara situação onde o número de constituintes do sistema, aqui o número de fendas, leva a um comportamento

bastante distinto para fenômenos ondulatórios como função de N . Em MQ tal tendência não é diferente.

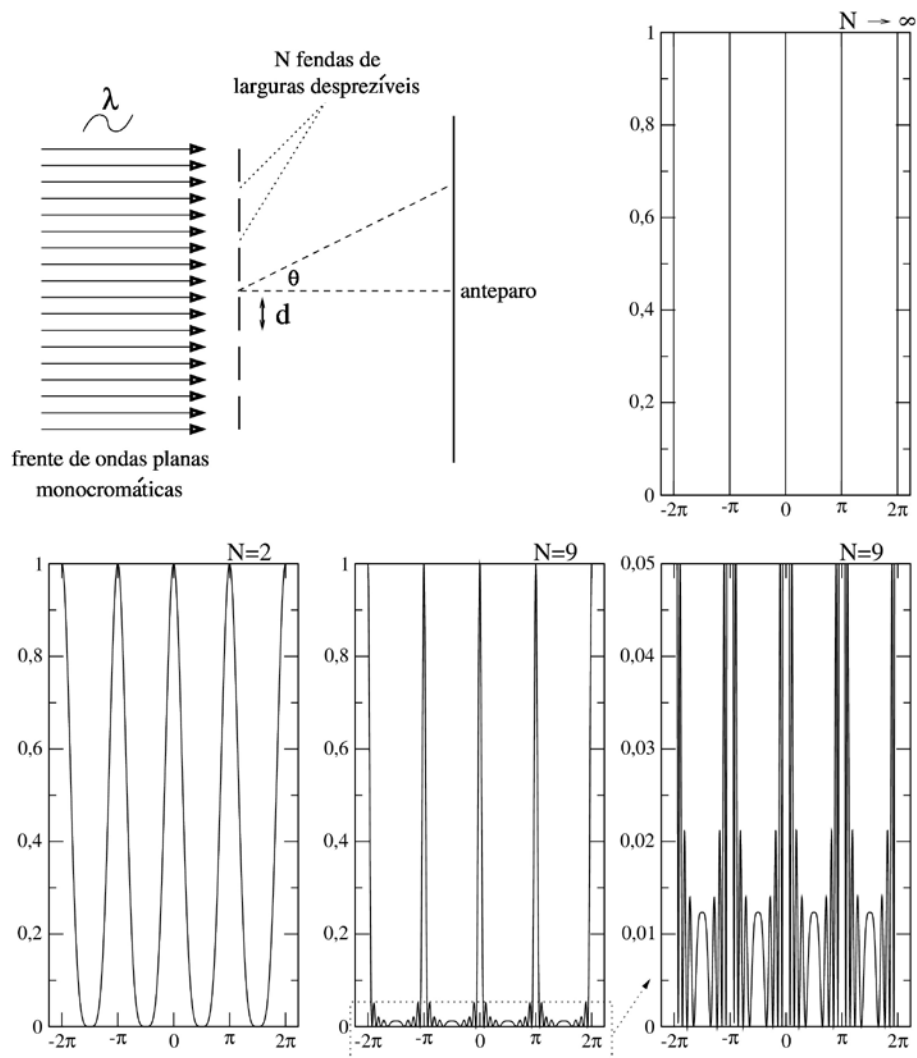


FIGURA 2. No topo à esquerda, representação esquemática de uma rede de difração com N fendas de larguras desprezíveis, cada uma de tamanho d . Luz monocromática (comprimento de onda λ), ao passar pelo sistema, forma um padrão de máximos e mínimos em um anteparo. As intensidades (normalizadas pelo pico máximo) *versus* o ângulo θ – calculadas pela fórmula de Fraunhofer (Joseph von Fraunhofer, físico alemão) – são mostradas para $N \rightarrow \infty$, $N=2$ e $N=9$, este último com detalhes dos máximos secundários mostrados na figura inferior à direita. Aqui temos $d/\lambda = 1/2$.

MECÂNICA QUÂNTICA E A FÍSICA DE NANOSISTEMAS: OUTROS “DOIS DEDOS DE PROSA”

As discussões na seção anterior tentaram justamente mostrar as diferenças no comportamento da matéria em função do tamanho espacial típico L e do número de constituintes N . Por um lado, temos agregação atômica e molecular, sendo obviamente a base fundamental na construção das diferentes substâncias. De uma forma extremamente simplificada, na formação de uma molécula orbitais atômicos dos distintos átomos irão apresentar superposição, formando os orbitais moleculares e ligando o sistema. Apesar de existirem moléculas “gigantes” (por exemplo, polímeros e materiais bio-orgânicos), tipicamente estamos falando de poucas unidades até centenas de átomos, com tamanhos na faixa de alguns nanômetros. Como ilustração, a hemoglobina tem um raio da ordem de 3,25 nm.

Por outro lado, encontramos a matéria arranjada em escalas macroscópicas, com N igual ao número de Avogadro (Lorenzo R. A. C. Avogadro, físico, advogado e político italiano) $N_A = 6,02214076 \cdot 10^{23}$ por mol da substância (e.g., 1 mol de água tem 18 g, logo, N_A moléculas de H_2O). Além disso, em escalas macroscópicas a estruturação da matéria condensada (aqui não iremos discutir fluidos) se dá de forma bem específica, determinada pela MQ. Por exemplo, considere um cristal perfeito. Os arranjos regulares dos átomos no espaço geram um perfil periódico de energia potencial enxergada pelos elétrons. Desta forma, o teorema de Bloch (Felix Bloch, físico suíço e prêmio Nobel de Física, 1952) juntamente com a teoria de bandas descrevem os estados possíveis para os elétrons no cristal e preveem quais intervalos de energia estes elétrons podem ocupar, determinando seu grau de localização ou deslocalização na rede. Num cristal metálico, naturalmente temos elétrons presentes na banda de condução (associada a estados espacialmente estendidos por todo o sistema, que, para qualquer efeito prático de análise das propriedades eletrônicas, tem um tamanho infinito). É justamente esta característica que torna os metais bons condutores de eletricidade.

Entre os dois extremos acima, podemos considerar uma situação intermediária que, de forma bem geral, é conhecido como mundo mesoscópico (meso = médio). Compreende uma região bastante elástica, desde grandes sistemas moleculares até aglomerados com dimensões entre centésimos e décimos de milímetro (logo na borda do limite macroscópico). Nanociência, portanto, pertence a este intervalo intermediário (meso) para a matéria (Das, 2010), mas estando em sua ponta inferior, compreendida entre 10 e 100–200 nm (em algumas áreas, como em farmacologia, 1.000 nm pode ser considerada uma (enorme) nanopartícula (Das, 2010)). Tomando então como “típico” um tamanho de 100 nm – equivalente ao comprimento usual de um nanotubo

de carbono, Figura 3 – isto corresponderia entre várias dezenas a algumas centenas de átomos.

Dadas as mencionadas convenções para as fronteiras delimitantes de nanosistemas, encontramos que os intervalos de valores para L e N levam a uma grande diversidade de comportamentos devido aos efeitos quânticos previamente considerados. Na verdade, várias propriedades fundamentais em nanociência são consequência direta de uma fenomenologia própria dessas escalas. Em um trabalho de escopo limitado como o presente, torna-se impossível discutir todos os processos emergentes em tais problemas. Portanto, no que se segue iremos destacar apenas três das principais características físicas em dimensões nanoscópicas, entretanto, sendo bastante representativas das peculiaridades da organização da matéria no universo nano (Das, 2010; Bonca & Kruchinin, 2011).

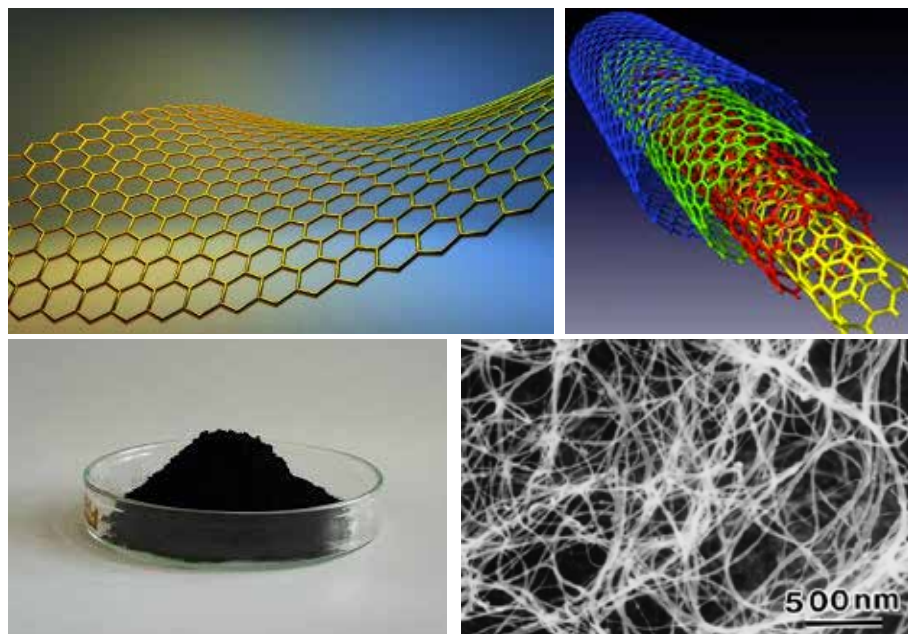


FIGURA 3. A partir do topo à esquerda, em sentido horário: estrutura esquemática de uma folha de grafeno; esquemas de nanotubos de carbono de diferentes diâmetros (que basicamente são folhas de grafeno enroladas na forma de um cilindro); imagem de microscopia eletrônica de nanotubos de carbono após processo de sintetização; pó de grafite (do grafite pode-se obter grafeno por processos tais como esfoliação).

– **Grande razão entre área superficial e volume S/V:** Para uma esfera de raio R, temos $V = 4/3\pi R^3$ e $S = 4\pi R^2$ e assim $S/V = 3/R$. Portanto, existe uma diferença de muitas ordens de grandeza entre tal razão para aglomerados de dezenas ou centenas de nanômetros e aqueles na faixa de centímetros. Desta forma, os fenômenos que acontecem nas superfícies de nanomateriais são

extremamente relevantes para suas propriedades globais de resistência mecânica, bem como de condução elétrica e térmica e respostas ópticas (Buzaneva & Scharff, 2004; Bonca & Kruchininj, 2008; Voltz, 2009), contrastando assim com boa parte dos materiais macroscópicos usuais. Essa grande importância relativa da superfície tem consequências físicas e químicas fundamentais. Por exemplo, devido a esta grande razão área-volume, tensões superficiais em nanoestruturas costumam ser consideráveis, influenciando muito na reatividade adesiva de nanopartículas (Figura 4) a outras superfícies (Rao et al., 2004; Lin et al., 2015).

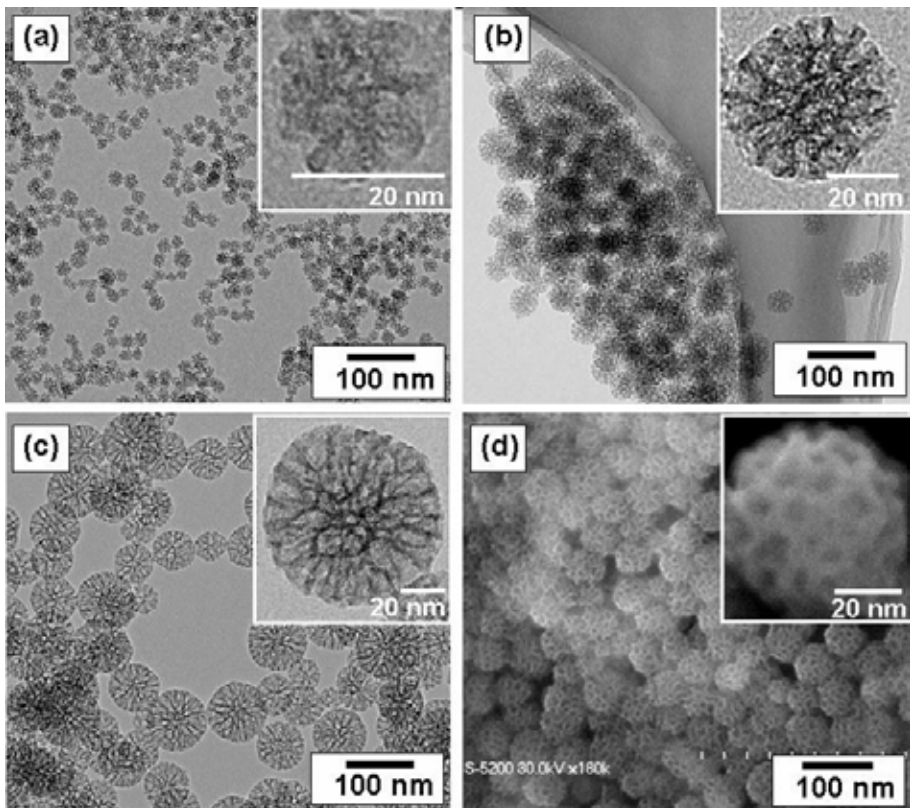


FIGURA 4. Nanopartículas são basicamente aglomerados de átomos tendo não mais que 100 nm em cada uma das três direções espaciais (entretanto, ver outras definições – similares - na Enciclopédia Britânica *on-line*, verbete *Nanoparticle*). Aqui são mostradas imagens de microscopia eletrônica de transmissão (a)-(c) e varredura (d) de nanopartículas de sílica.

– **Confinamento quântico:** Como já argumentado, o volume de materiais macroscópicos pode ser considerado infinito na análise de suas propriedades elétricas, ópticas, térmicas, etc. Entretanto, os comprimentos característicos L de sistemas nanoscópicos são apenas dezenas de vezes maiores que os com-

primentos de onda λ de de Broglie (Louis V. P. R. de Broglie, 7º Duque de Broglie, físico francês e prêmio Nobel de Física, 1929) dos elétrons nestes materiais (na verdade, em certos casos, como nanopartículas metálicas, podemos até mesmo ter $\lambda \sim L$). Logo, o tradicional problema em MQ de “uma partícula quântica numa caixa” torna-se qualitativamente relevante para a descrição teórica de nanosistemas. Devido ao confinamento, o elétron consegue “sentir” as bordas do material e isto fortemente determina seus estados eletrônicos, tornando-os discretos, e cujos valores de energia passam a depender explicitamente do comprimento L do sistema.

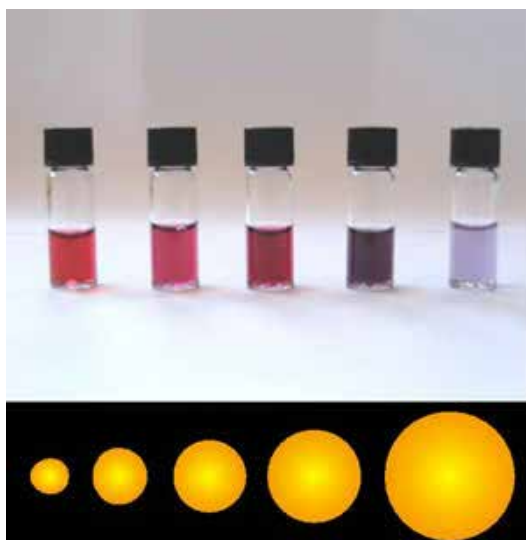


FIGURA 5. Soluções com nanopartículas de ouro de diferentes tamanhos, representadas abaixo (imagem de Aleksandar Kondinski).

Uma consequência interessante tem relação com a cor destes materiais. De fato, a fluorescência de nanosistemas está relacionada com duas propriedades, efeitos de área e confinamento. Vamos ilustrar estes dois processos em duas situações a seguir.

(i) Como já mencionado, em cristais temos bandas de energia para os estados eletrônicos. No caso de metais, a banda de condução é parcialmente preenchida com elétrons, significando que estes materiais são condutores elétricos. Considere então o ouro usual, cuja cor é o amarelo (a luz amarela tem comprimento de onda na faixa de 550-590 nm e o fóton corresponde a uma energia por volta de 2.26 eV). A banda 3d tem maior eficiência de absorção de radiação no caso do ouro metálico, com uma eficiência máxima em torno de 2.3 eV, tipicamente levando o elétron para bandas acima do nível de Fermi (Enrico

Fermi, físico italiano naturalizado americano e prêmio Nobel de Física, 1938). Portanto, estes elétrons, quando decaem, reemitem na faixa do amarelo. Mas, para uma nanopartícula de ouro, suas dimensões espaciais limitadas naturalmente mudam os estados eletrônicos disponíveis para os elétrons. No entanto, ainda apresenta elétrons de condução. Tais elétrons podem ser excitados por radiação de comprimento de onda da ordem do tamanho da nanopartícula, formando plasmônios superficiais localizados (plasmônios são quantizações de oscilações de plasma, no presente caso um gás de elétrons). Para certos valores de frequências das ondas eletromagnéticas incidentes há ressonância e a radiação é fortemente absorvida. O complementar das frequências absorvidas são justamente as ondas refletidas, dando a cor das nanopartículas. Por exemplo, para nanopartículas com $L \sim 30$ nm, as ressonâncias ocorrem na faixa do azul-verde. Assim, a luz espalhada apresenta tonalidade vermelho forte, sendo a cor observada em uma solução de nanopartículas de ouro dispersas (ver Figura 5).

(ii) A situação acima é uma combinação de efeitos de confinamento com estados quânticos de superfície. Em nanosistemas semicondutores (chamados pontos quânticos) a fenomenologia de uma “partícula numa caixa” é ainda mais marcante. Cristais semicondutores em geral possuem elétrons apenas na banda de valência. Com o confinamento em nanoescala, as bandas se tornam na verdade um conjunto de estados próximos, mas discretos. A fluorescência destes materiais (a cor que emitem) será então o resultado da excitação ressonante por radiação eletromagnética e posterior decaimento dos elétrons com a reemissão de luz em uma certa frequência, associada à diferença de energia entre tais níveis quantizados. O espectro de cores obtido com pontos quânticos praticamente varre todo o espectro visível (Figura 6).

– **Interação com o meio e sistemas abertos:** Sistemas nanoscópicos, dadas suas características particulares relativas ao número de átomos e a dimensões espaciais, são muito suscetíveis a interações com o meio no qual se encontram. Basta relembrar que devido à sua grande razão S/V , a física e a química que ocorrem na superfície de uma nanopartícula são fundamentais na determinação das propriedades do sistema, mas é justamente a superfície que está em direto contato com o ambiente. Desta forma, nanosistemas são um dos melhores exemplos de sistemas quânticos abertos (Lovett & Nazir, 2009), onde fenômenos de descoerência quântica (Das, 2010; Bouchiat et al., 2005), de transporte quântico fora do equilíbrio (Buot, 2009) e mesmo de não linearidade (Jacobs & Landahl, 2009; Luz & Anteneodo 2011) (efeitos cujo detalhamento foge do escopo da presente discussão, mas veja Breuer & Petruccione, 2007) irão naturalmente aparecer. Por exemplo, funcionalidades de nanopartículas podem mudar drasticamente dependendo do meio (Rao et al., 2004; Lin et al., 2015).

Isto torna nanosistemas extremamente versáteis em aplicações como sensores (Khanna, 2012) e em usos biomédicos (Walkey et al., 2009), pois responderão de formas distintas em decorrência das especificidades do ambiente.



FIGURA 6. Soluções com nanopartículas (aqui pontos quânticos) de Perovskita. As cores dependem do tamanho e da exata composição química dos nanocristais. São comercializados pela Quantum Solutions (<https://quantum-solutions.com/>).

Obviamente que todas as discussões até aqui estão ainda muito longe de esgotar a enorme fenomenologia que surge de efeitos quânticos na agregação da matéria em escala nanoscópica. O objetivo aqui não foi listar todos os principais mecanismos relacionados com a física em nanoescala. Ao contrário, foi apenas apresentar um pequeno conjunto de processos representativos do rico mundo da nanociência.

A seguir iremos percorrer, também de forma resumida, sobre a relevância de nanosistemas em aplicações tecnológicas.

UM BREVE PANORAMA DE APLICAÇÕES DE NANOCIÊNCIA

Em primeiro lugar, é importante salientar que muitas vezes não é fácil definir as fronteiras do que seja a nanotecnologia. Biologia é um ótimo exemplo para isto. Vários componentes de uma célula têm dimensões nanométricas e, desta maneira, muitas tecnologias associadas às ciências biológicas são classificadas como nanotecnologia. Com a bionanotecnologia, busca-se fazer dispositivos na mesma escala de constituintes de organismos vivos e assim tentarmos mimetizar invenções que a natureza produziu ao longo de centenas de milhões de anos de evolução. Uma característica importante da nanotecnologia é o seu caráter multidisciplinar, já que ela associa necessariamente

avanços em Física, Química e Biologia, com aplicações em Engenharias, Farmacologia e Medicina, só para citar algumas áreas.

Como já frisado, a nanotecnologia se aproveita das propriedades especiais mecânicas, elétricas, térmicas, ópticas, estruturais e de reatividade química dos nanomateriais e nanopartículas para o desenvolvimento de uma enorme gama de aplicações tecnológicas em setores industriais tão diversos, como energia, ambiente, informação, eletrônica, saúde, aeroespacial, automotiva, alimentação, cosméticos, construção, etc. A nanotecnologia tem sido usada para tornar materiais, metálicos e cerâmicos, por exemplo, mais resistentes, fortes e leves. Isto se dá por um rejuntamento de grãos de tamanhos microscópicos e nanoscópicos compondo materiais nanomodificados. As propriedades mecânicas são fortemente dependentes do tamanho destes grãos e quanto menores forem, mais duros serão os compostos resultantes. Também é possível alterar as propriedades mecânicas, elétricas e óticas de sistemas pertencentes ao que costumamos chamar de “matéria mole” (como polímeros) ao adicionarmos nanopartículas em sua constituição.

Em geral, podemos categorizar as iniciativas em nanotecnologia em atividades de resultados de curto, médio e longo prazos, ou como nanotecnologias de primeira, segunda e terceira gerações. A nanotecnologia de primeira geração busca melhorar o desempenho de materiais já convencionais, como plásticos, tintas, revestimentos, cerâmicas, cimento, vidros, etc. A nanotecnologia de segunda geração baseia-se em sistemas ativos na escala nanométrica, que alteram assim suas funções e propriedades durante o processo de utilização. Uma ótima ilustração são os medicamentos de liberação controlada de drogas, que são constituídos de macromoléculas nanométricas, como nanotubos de carbono, nas quais é possível armazenar um medicamento em seu interior (Khanna, 2012; Walkey et al., 2009). Estas macromoléculas podem ser injetadas em um ser humano e o medicamento em seu interior é liberado lentamente para a corrente sanguínea. Este tipo de técnica mantém constante a concentração do medicamento no organismo, impedindo as variações significativas da concentração quando o medicamento é dosado de uma única vez no corpo humano.

A nanotecnologia de terceira geração busca o uso de propriedades totalmente novas, diretamente associadas à dimensão nanométrica dos constituintes. Nesta linha podemos citar distintos sensores (Buzaneva & Scharff, 2004; Khanna, 2012). Há ainda algumas propostas que nos dias atuais soam como ficção científica, e.g., criar nanorobôs com várias finalidades (principalmente em medicina e meio ambiente), mas certamente serão realidade num futuro não muito distante (Yang et al., 2019). Vários produtos baseados em nanotecnologia de primeira geração já são efetivamente comercializados. Isto também ocorre para certas aplicações de nanotecnologia de segunda geração. Na verdade, muitas ideias se encontram em fase de desenvolvimento, con-

seguindo atrair investimentos do tipo “capital de risco”, dadas as fortes expectativas de resultados a curto prazo (aqui citamos em particular as áreas de bionanotecnologia e cosméticos dentro do escopo da segunda geração). Por último, os princípios de funcionamento de diversos dispositivos associados a nanotecnologias de terceira geração estão sendo demonstrados em diferentes laboratórios em todo o planeta (Mensah et al., 2018), mas ainda estão sendo majoritariamente financiados por entidades governamentais ou por grandes empresas (GE, HP, IBM, Intel, Merck, etc.), em função de seu potencial de retorno apenas de médio a longo prazo.

Uma vez que o leque de utilização de nanotecnologia é muito extenso, para finalizar iremos considerar três campos relevantes onde o emprego de nanociência se encontra especialmente avançado.

– **Nanoprocessadores e dispositivos de informação:** A nanotecnologia tem um particular potencial impacto nas áreas de informação. A maioria dos dispositivos eletrônicos atuais é constituída de centenas de milhões de transistores impressos em um bloco de silício. A cada ano, são aprimoradas as técnicas de fabricação, permitindo assim a diminuição do tamanho dos transistores individuais, com conseqüente aumento da capacidade de processamento e a frequência de funcionamento de um processador. A chamada “lei de Moore”, que vem sido observada há 50 anos, mostra que o número de transistores em um circuito integrado dobra a cada 24 meses. No entanto, uma série de dificuldades técnicas impõe limites ao tamanho mínimo dos transistores que podem ser esculpidos, em escala industrial, em um bloco de silício, e presume-se que a “lei de Moore” baseada no silício deixará de ser observada dentro de poucos anos. Desta forma, os dispositivos da nanoeletrônica deverão ser os substitutos naturais aos dispositivos microeletrônicos baseados puramente no silício (de Voorde et al., 2017). Já foi demonstrada recentemente a possibilidade de se construir transistores muito menores do que os atuais usando-se nanotubos de carbono e moléculas orgânicas. Também uma importante possibilidade são os sistemas híbridos moleculares-semicondutores (de Voorde et al., 2017). A nanotecnologia busca também desenvolver lasers e diodos baseados em materiais semicondutores de tamanho nanométrico, que emitam luz com frequências bem definidas para diferentes tipos de aplicações nas áreas de comunicação óptica (Gu et al., 2016) e de dispositivos opto-eletrônicos.

Também, a utilização de materiais magnéticos para o armazenamento de informação teve um enorme progresso nos últimos anos devido à fabricação de filmes extremamente finos, com espessuras de 1 nm ou menos. Um dos fenômenos mais interessantes nesta linha é conhecido como magneto-resistência gigante, observada em multicamadas ultrafinas de materiais magnéticos intercalados com filmes metálicos não magnéticos (Givord, 2007). Dispositi-

vos baseados neste efeito já vêm sendo amplamente usados como cabeças de leitura e gravação de discos de computadores.

– **Nanocompósitos:** Em ciência e engenharia de materiais, um compósito é uma “mistura” de dois ou mais tipos de materiais. A ideia é que tal substância resultante mantenha as boas propriedades de cada um dos materiais envolvidos. Busca-se assim a multifuncionalidade destes sistemas. Entretanto, a mistura se torna muito mais homogênea (e eventualmente mais equilibrada em termos das propriedades desejadas) quando um dos materiais tem dimensões nanométricas. Os nanocompósitos correspondem então a uma mistura de um material convencional com nanopartículas feitas de outros materiais. Assim, podemos tornar o material convencional (plásticos, resinas, cimento, vidros, cerâmicas, etc.) mais resistentes mecânica e termicamente ou mesmo em um bom condutor de eletricidade. Por exemplo, compósitos de polímeros com nanopartículas de silicatos, como a argila, são geralmente mais fortes, mais resistentes ao calor e quimicamente menos reativos do que o polímero puro, entretanto, mantendo a transparência deste último. Tal tipo de nanocompósito é usado em embalagens e peças de automóveis. Na verdade, na indústria automotiva há forte interesse nestes materiais nanoestruturados, pois os mesmos poderiam auxiliar na redução de consumo de combustível e na emissão de dióxido de carbono ao meio ambiente (um dos fortes candidatos para este uso é o nanocomposto de óxido de TiO_2 /grafeno).

Usando o efeito de gaiola de Faraday (Michael Faraday, físico inglês), compósitos de nanomateriais metálicos com plásticos já têm sido empregados em carcaças de equipamentos eletrônicos com o intuito de blindá-los de cargas eletrostáticas e interferências eletromagnéticas. Nanomateriais têm sido usados também como abrasivos, como pigmentos para tintas, e como revestimentos para vidros e lentes. Alguns tipos de colas contêm nanomateriais que aumentam suas propriedades de adesão. Nanotubos de carbono são amplamente usados para se melhorar as propriedades mecânicas, térmicas, elétricas, estruturais e químicas de diferentes tipos de materiais convencionais.

– **Nanotubos de carbono (NT):** Os nanotubos de carbono são folhas monocamada de grafite (grafeno) enroladas na forma de um cilindro, com diâmetros de aproximadamente 1 nm, Figura 3 (aqui é interessante mencionar que o grafite – do grego *graphein*, escrever – é um dos materiais mais antigos encontrados e conhecidos pelo homem, ver *Enciclopédia Britânica on-line*, verbete *Graphite-Carbon*). NT foram sintetizados pela primeira vez em 1991 e são hoje considerados como um dos materiais mais importantes e promissores em nanotecnologia, uma vez que apresentam propriedades eletrônicas, térmicas, estruturais, mecânicas e químicas excepcionais. De fato, várias características justificam tais expectativas sobre NT (Dresselhaus et al., 2000)[22]. De todos

os materiais naturais, o grafite tem o maior ponto de fusão (4.200 K), a maior condutividade térmica, e uma grande mobilidade eletrônica à temperatura ambiente. O grafite e as fibras de carbono têm sido usados comercialmente já há décadas. Suas aplicações vão desde materiais condutores e sistemas de reforço mecânico (por exemplo, na indústria aeroespacial) a eletrodos (por exemplo, em baterias), com um mercado estimado em 30 bilhões de dólares (dados de 2018). Entre os diferentes tipos de nanomateriais sintetizados artificialmente, os nanotubos de carbono certamente estão entre aqueles que apresentam as maiores taxas de crescimento em termos de desenvolvimentos tecnológicos e retorno financeiro.

Como decorrência destas propriedades, NT têm sido usados no desenvolvimento de diferentes tipos de dispositivos, como sensores de gases e sensores biológicos, baterias, capacitores, pontas de prova para microscopias de varredura, emissores de elétrons, *displays*, dispositivos fotovoltaicos, aplicações médicas, entre outras. Quando misturados a diferentes materiais, tais como polímeros e cerâmicas, na forma de nanocompósitos, NT modificam drasticamente as propriedades mecânicas, térmicas, químicas e elétricas das matrizes. Adicionalmente, já foram desenvolvidos dispositivos eletrônicos, como diodos e transistores, a partir de nanotubos de carbono, tendo sido inclusive construídos circuitos lógicos com estes dispositivos. A perspectiva é que nanotubos passem a ter um papel chave em nanoeletrônica (de Voorde et al., (2017). Na verdade, mesmo a novíssima área de Computação Quântica já vem usando NT tanto como forma de implementar os famosos “qubits” (Rips & Hartmann, 2013) como em dispositivos auxiliares para processamento de informação quântica (Moghaddam et al., 2019).

AGRADECIMENTOS

O autor Marcos G. E. da Luz agradece o apoio recebido da Sociedade Brasileira de Física para participar do evento.

REFERÊNCIAS

- Bonca, J. & Kruchinin, S. (Eds.). (2008). *Electron Transport in Nanosystems*. Dordrecht: Springer.
- Bonca, J. & Kruchinin, S. (2011). *Physical Properties of Nanosystems*. Dordrecht: Springer.
- Bouchiat, H., Gefen, Y., Gueron, S., Montambaux, G. & Dalbard, J. (Eds.). (2005). *Nanophysics: Coherence and Transport*. Amsterdam: Elsevier Science.

- Breuer, H.-P. & Petruccione, F. (2007). *The Theory of Open Quantum Systems* Oxford: Oxford University Press.
- Buot, F. A. (2009). *Nonequilibrium Quantum Transport Physics in Nanosystems*. Singapore: World Scientific.
- Buzaneva, E. & Scharff, P. (Eds.). (2004). *Frontier of Multifunctional Integrated Nanosystems*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Das, M. P. (2010). Mesoscopic systems in the quantum realm: fundamental science and applications. *Adv. Nat. Sci.: Nanosci. Nanotechnol.*, 1, 043001.
- de Voorde, M. V., Puers, R., Baldi, L. & van Nooten, S. E. (Eds.). (2017). *Nanoelectronics: Materials, Devices, Applications*. Weinheim, Wiley-VCH.
- Dresselhaus, M. S., Eklund, P. C., Pimenta, M. A. & Dresselhaus, G. (2000). Raman scattering in fullerenes and related carbon-based materials. In Weber, W. & Merlin, R. (Eds.). *Raman Scattering in Carbon Materials*. Berlin: Springer-Verlag. p. 314-364.
- Givord, D. (2007). Magnetism in Nanomaterials. In Bréchnignac, C., Houdy, P. & Lahmani, M. (Eds.). *Nanomaterials and Nanochemistry*. Berlin: Springer-Verlag. p. 101-134.
- Gu, M., Zhang, Q. & Lamon, S. (2016). Nanomaterials for optical data storage. *Nat. Rev. Mat.*, 1, 16070.
- Jacobs, K. & Landahl, A. J. (2009). Engineering giant nonlinearities in quantum nanosystems, *Phys. Rev. Lett.*, 103, 067201.
- Khanna, V. K. (2012). *Nanosensors: Physical, Chemical, and Biological*. Boca Raton: CRC Press.
- Lin, L., Pedersen, F. A., Greeley, J. & Norskov, J. K. (2015). Surface tension effects on the reactivity of metal nanoparticles. *J. Phys. Chem. Lett.*, 6, 3797.
- Lovett, B. W. & Nazir, A. (2009). Aspects of quantum coherence in nanosystems, *Eur. J. Phys.*, 30, S89.
- Luz, M. G. E. da & Anteneodo, C. (Eds.). (2011). Nonlinear dynamics in meso and nano scales: fundamental aspects and applications. *Philos. Trans. Royal Soc., A*, 366. Special issue, 1935.
- Mensah, T. O., Wang, B., Bothun, G., Winter, J. & Davis, V. (2018). *Nanotechnology Commercialization*. Hoboken: Wiley-AIChE.
- Moghaddam, M. V., Chang, C. W. S., Nsanzineza, I., Vadiraj, A. M. & Wilson, C. M. (2019). Carbon nanotube-based lossy transmission line filter for superconducting qubit measurements. *Appl. Phys. Lett.*, 115, 213504.
- Rao, C. N. R., Müller, A. & Cheetham, A. K. (Eds.). (2004). *The Chemistry of Nanomaterials*. Weinheim: Wiley-VCH.
- Rips, S. & Hartmann, M. J. (2013). Quantum information processing with nanomechanical qubits, *Phys. Rev. Lett.*, 111, 049905.
- Voltz, S. (Ed.). (2009). *Thermal Nanosystems and Nanomaterials*. Berlin: Springer.

Walkey, C., Sykes, E. A. & Chan, W. C. W. (2009). Application of semiconductor and metal nanostructures in biology and medicine. *Hematology Am. Soc. Hematol. Educ. Program*, 701. doi:10.1182/asheducation-2009.1.701.

Yang, J., Zhang, C., Wang, X., Wang, W., Xi, N. & Liu, L. (2019). Development of micro and nanorobotics: a review. *China Technol. Sci.*, 62(1).

FÍSICA NUCLEAR NAS ESTRELAS

NUCLEAR PHYSICS ON THE STARS

Ivo Sengo¹
Constança Providência²
Helena Pais³

RESUMO

A interação forte das partículas que compõem o núcleo atômico é descrita pela Cromodinâmica Quântica (QCD), teoria que, embora matematicamente robusta, é difícil de ser estudada sob o ponto de vista de primeiros princípios: a teoria das perturbações, ferramenta principal do cálculo de observáveis de uma teoria quântica, só se aplica à QCD numa pequena gama de energias e a QCD na rede exige muito poder computacional. Logo, são necessárias outras técnicas para obter previsões a partir da teoria. Uma das abordagens consiste em construir uma teoria efetiva que, dentro de um certo regime, consegue reproduzir os resultados da teoria mãe. Os parâmetros dos modelos efetivos devem ser escolhidos de modo a reproduzir os resultados experimentais. As estrelas de neutrões servem de laboratório de teste para tais modelos. Os modelos efetivos da QCD permitem construir a equação de estado da matéria nuclear das estrelas. Com esta informação é então possível, resolvendo as Equações de Einstein, obter observáveis macroscópicos das estrelas, que podem depois servir para avaliar os nossos modelos. Este trabalho foca-se no efeito que os campos magnéticos intensos têm na geometria das estrelas de neutrões. Este estudo permite dar resposta a questões relativas a transições de fase da matéria nuclear existente nas estrelas.

Palavras-chave: Estrelas de neutrões, Física nuclear, Gravitação.

EXTENDED ABSTRACT

The nuclear interaction inside the atomic nucleus is governed by Quantum Chromodynamics (QCD), a theory which, although mathematically sound, presents some shortcomings when it comes to its usefulness in calculations of the properties of extreme matter, such as that that can be found in the interior of a neutron star. This happens in part because perturbation theory, the main tool when it comes to extracting information from a quantum theory, does not apply well at every energy scale. Also, lattice QCD, which is based on first principles, demands very huge computational power. To tackle this, physicists develop a set of effective theory that can reproduce, in some extent,

¹ CFisUC, Departamento de Física, Universidade de Coimbra, ivoabs@gmail.com

² CFisUC, Departamento de Física, Universidade de Coimbra, cp@uc.pt

³ CFisUC, Departamento de Física, Universidade de Coimbra, hpais@uc.pt

the properties of the main theory. Neutron stars play an important role on the construction of such theories as they allow us to put those theories to test: with an effective theory of nuclear matter one can construct an equation of state which, together with the Einstein equations of gravity, allow us to calculate the macroscopic properties of a star described by such model. If the theory predicts nonsensical mass or radius values for the star, then our description the microscopic interactions inside the star are probably wrong.

Neutron stars are the remnants of the collapse of giant stars: from a star of about eight solar masses and 10^8 km, a star of about 10 km and a mass comparable to that of our Sun is formed (Glendenning, 2000). These stars are the densest materials in Nature. This, together with the fact that these stars can possess magnetic fields of the order of 10^{15} G, and that they can rotate at frequencies up to 700 Hz, makes necessary the use of a full general relativist treatment in their study. In this work we use the numerical relativity library LORENE, which allow for a self-consistent of magnetized and rotating stars (Eric Gourgoulhon, 1999).

In this work, neutron star matter is described using the relativistic mean-field model NL3 $\omega\rho$ (Fang, Pais, Pratapsi, & Providência, 2017), which verifies a series of experimental tests and allow for a $2.2 M_{\odot}$ star. Neutron stars are also associated with extreme astrophysical phenomena, such as glitches, a sudden change in the rotational frequency, and flares, a burst of huge amounts of energy. These two phenomena are thought to be related to the crust region of the star and, and in this work we try to understand the effects of the magnetic field on this very region, as an attempt to shed some light on the above-mentioned phenomena. In particular, we try to understand how the symmetry energy affects the way the model responds to the presence of magnetic fields. We also analyse whether the change of sign of the Lorentz force (Franzon, Nereiros, & Schramm, 2017) is somehow related to the extended crust, which must be taken into account when dealing with highly magnetized stars (Fang, Pais, Pratapsi, & Providência, 2017).

Key-words: Neutron stars, Nuclear Physics, Gravitation.

INTRODUÇÃO

Estrelas de neutrões (EN) são os resquícios do colapso de estrelas gigantes: a partir de uma estrela de cerca de oito massas solares e com mais de 10^8 km, forma-se uma estrela com cerca de 10 km e com uma massa comparável à do nosso Sol (Glendenning, 2000). A matéria no interior destas estrelas é a mais densa que existe na Natureza – chega a ser 10^{14} vezes mais densa que a Terra.

Para além disso, estas estrelas podem apresentar campos magnéticos muito intensos, podendo variar entre os 10^8 e os 10^{15} G (Konar, 2017) e rodar a frequências de até 700 Hz (Cipolletta, Cherubini, Filippi, Rueda, & Ruffini, 2015). Neste artigo pretendemos explorar algumas das consequências que tais campos intensos possam ter na região da crosta das estrelas. Pensa-se que esta região da estrela está associada a fenómenos extremos como os *flares*, explosões abruptas de enormes quantidades de energia, e os *glitches*, mudanças bruscas na frequência de rotação da estrela, daí a importância do seu estudo.

A dinâmica do campo magnético no interior das estrelas de neutrões ainda não é conhecida na perfeição, bem como os efeitos que estes possam ter nas propriedades da matéria no interior da estrela (Kaspi & Beloborodov, 2017). No presente artigo pretende-se traçar algumas linhas que possam servir de diretrizes para aprofundar o estudo dos efeitos que os campos magnéticos têm na matéria das EN, em particular na região da crosta interna.

A matéria das estrelas de neutrões será aqui descrita com base num modelo relativista de teoria de campo médio, conhecido na literatura como NL3 ω p (Pais & Providência, 2016; Lalazissis, König, & Ring, 1997). Este modelo satisfaz uma série de limites experimentais para a matéria nuclear (Dutra et al., 2014), incluindo os da recente deteção de ondas gravitacionais GW170817 (Malik et al., 2017). Neste trabalho usamos duas parametrizações desta família de modelos: o modelo com o valor do declive da energia de simetria, $L = 55$ MeV, e outro com $L = 88$ MeV.

O facto de se ter em conta os efeitos do campo magnético faz com que a estrela deixe de ter simetria esférica e, portanto, para a determinação das suas propriedades macroscópicas, tais como massa e raio, passa a ser necessário recorrer a métodos numéricos para a resolução das Equações de Einstein (Bona, Palenzuela-Luque, & Bona-Casas, 2009). Para esse feito, recorreu-se à biblioteca de relatividade numérica em código aberto LORENE (Ericourgoulhon, 1999). Esta ferramenta permite o cálculo consistente de estrelas magnetizadas e com rotação por meio do formalismo desenvolvido por Bonazzola, Gourgoulhon, Salgado, & Marck (1993).

EFEITO DO CAMPO MAGNÉTICO NA CROSTA DAS ESTRELAS

A presença de campos magnéticos em estrelas de neutrões faz com que a transição entre a região interna da crosta e o núcleo (*core*) seja caracterizada por uma zona intermédia onde existe uma mistura entre matéria dos dois tipos, isto é, matéria homogénea e não homogénea (cf. Figura 1), aqui designada por crosta estendida (Fang, Pais, Pratapsi, & Providência, 2017). Este resultado é obtido por meio do estudo da spinodal dinâmica, tendo em conta as flutuações

nos campos da matéria induzidas pelo campo magnético. Com estas considerações, a transição crosta-núcleo passa a ser descrita não por um valor de densidade, mas sim por uma gama de densidades $\rho_1 - \rho_2$.

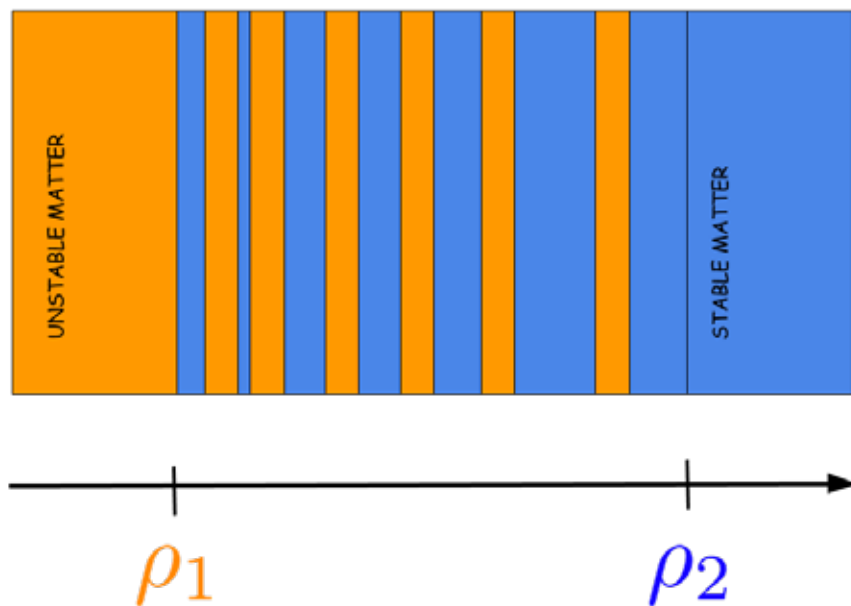


FIGURA 1. Crosta estendida. A presença do campo magnético faz com que a zona de transição entre a crosta e o núcleo consista numa região onde matérias homogénea e não homogénea coexistem.

Um dos objetivos do estudo consiste em estudar como é que os dois modelos escolhidos diferem na sua resposta à presença do campo magnético. A Figura 2 mostra como a espessura total da crosta, ΔR_2 e a zona da crosta estendida, ΔR_1 , variam com o aumento da magnitude do campo magnético (mais concretamente, a componente radial do campo superficial medido no polo).

Estes resultados ajudam, em certa medida, a perceber a importância de se ter em conta os efeitos do campo magnético na descrição das EN: embora os dois modelos não difiram muito entre si no caso em que $B = 0$, estes apresentam um comportamento muito distinto quando sujeitos ao campo magnético, sendo o modelo com o L maior o mais sensível às variações do campo.

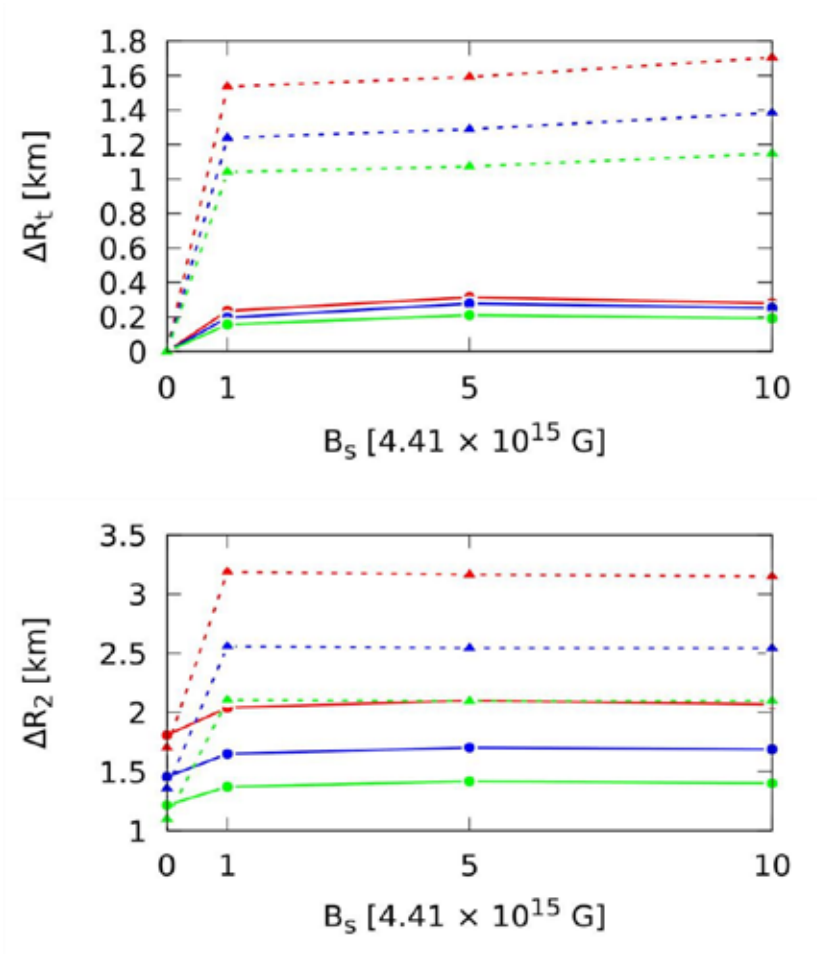


FIGURA 2. Variação da espessura crosta estendida em função do campo magnético (topo) e variação da espessura total da crosta em função do campo (painel inferior). As linhas cheias correspondem ao modelo com $L = 55$ MeV, enquanto que as linhas a tracejado ao modelo com $L = 88$ MeV. As cores verde, azul e vermelha correspondem às massas bariônicas de 1.2 , 1.5 e $1.8 M_\odot$, respetivamente.

Outra questão pertinente relativamente ao estudo dos efeitos do campo magnético na matéria da estrela é o comportamento da força de Lorentz no interior desta. Estudos anteriores neste âmbito chamam a atenção para o facto da existência de uma região onde esta força sofre uma mudança de sinal (Franz, Negreiros, & Schramm, 2017), facto que poderia estar relacionado com alguns dos fenómenos extremos que estão associados a estas estrelas. Um dos objetivos deste trabalho era verificar, aplicando uma equação de estado unificada entre a crosta interna e o core para descrever a estrela, sujeita a campos magnéticos externos muito fortes, em que região da estrela ocorre esta mudan-

ça de sinal, i.e., a localização da linha neutra. A Figura 3 é um dos resultados desse estudo, onde mostramos o comportamento do potencial magnético, M , no interior da estrela, medido ao longo do plano equatorial. O gradiente do potencial magnético é proporcional à força de Lorentz, daí que o ponto onde ocorre a mudança de sinal irá coincidir com o mínimo da função M . Para os modelos considerados, verificou-se que esta mudança ocorre sempre fora da crosta estendida; no entanto, restam ainda algumas questões relativamente ao comportamento da força de Lorentz como, por exemplo, onde ela atinge os valores máximos e o que se pode dizer das fases de pasta nessa região (Ravenhall, Pethick, & Wilson, 1983), ou, ainda, como é que a localização da linha neutra e máximo da força de Lorentz são afetados pela rotação.

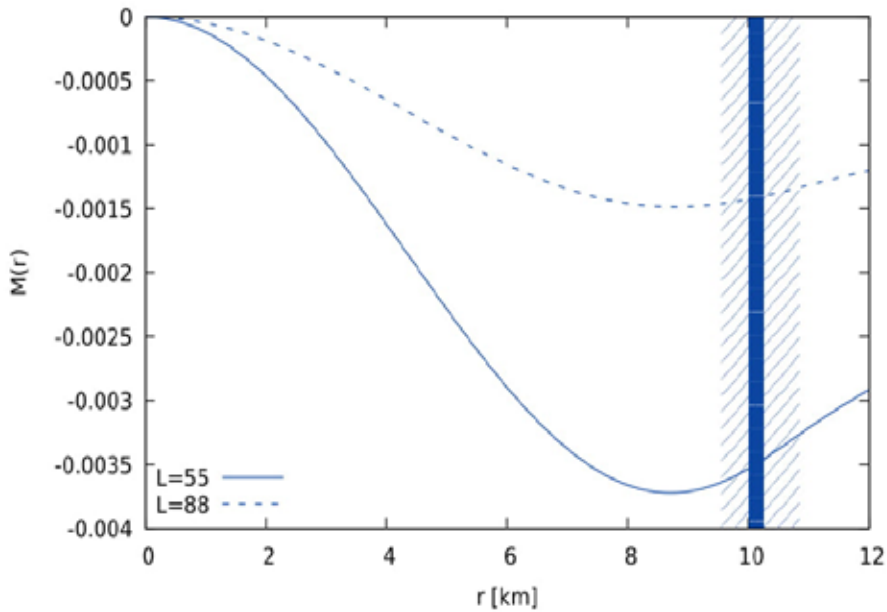


FIGURA 3. Comportamento do Potencial magnético, M , medido no plano equatorial, ao longo do interior da estrela. Para os dois modelos, a massa bariônica é de $1.5 M_{\odot}$. As bandas verticais correspondem à região da crosta estendida para cada um dos modelos.

CONCLUSÃO

O estudo aqui apresentado permite concluir ser importante se ter em conta os efeitos do campo magnético no estudo da matéria de estrelas de nêutrons: modelos não tão díspares, na ausência de um campo magnético, apresentam propriedades (no caso estudado, o tamanho da crosta) muito diferentes

quando sujeitos a campos magnéticos intensos. Nisto, verificou-se que o modelo com o maior valor de L é o mais sensível a variações no campo.

Conclui-se também que a zona da crosta estendida não contém a região onde ocorre a mudança de sinal da força de Lorentz. No entanto, este estudo precisa ainda de ser complementado com uma análise do comportamento da força de Lorentz no interior da estrela, identificando os pontos onde ela é máxima e o tipo de fase de matéria dessa região. Por exemplo, fases de matéria com estruturas mais alongadas (slabs), estão mais suscetíveis a quebras, pelo que seria interessante saber em que região estas se localizam relativamente ao máximo da força de Lorentz. Será também interessante saber de que forma é que os resultados aqui apresentados são alterados com a inclusão da rotação.

AGRADECIMENTOS

O autor Ivo Sengo gostaria de agradecer à Galp pela bolsa para participar na 3ª Conferência de Física dos Países de Língua Portuguesa.

REFERÊNCIAS

- Bona, C., Palenzuela-Luque, C., & Bona-Casas, C. (2009). *Elements of Numerical Relativity and Relativistic Hydrodynamics*. Springer Berlin Heidelberg. doi: 10.1007/978-3-642-01164-1
- Bonazzola, S., Gourgoulhon, E., Salgado, M., & Marck, J. A. (1993). Axisymmetric rotating relativistic bodies: a new numerical approach for ‘exact’ solutions. *Astronomy and Astrophysics*, 278, 421-443.
- Cipolletta, F., Cherubini, C., Filippi, S., Rueda, J., & Ruffini, R. (7 de 2015). Fast rotating neutron stars with realistic nuclear matter equation of state. *Physical Review D*, 92. doi: 10.1103/physrevd.92.023007
- Dutra, M., Lourenço, O., Avancini, S. S., Carlson, B. V., Delfino, A., Menezes, D. P., ... Stone, J. R. (11 de 2014). Relativistic mean-field hadronic models under nuclear matter constraints. *Physical Review C*, 90. doi: 10.1103/physrevc.90.055203
- Eric Gourgoulhon, e. a. (1999). LORENE. *LORENE*.
- Fang, J., Pais, H., Pratapsi, S., & Providência, C. (2017). Crust-core transition of a neutron star: effects of the symmetry energy and temperature under strong magnetic fields. *Phys. Rev.*, C95, 062801. doi: 10.1103/PhysRevC.95.062801
- Franzon, B., Negreiros, R., & Schramm, S. (12 de 2017). Magnetic field effects on the crust structure of neutron stars. *Physical Review D*, 96. doi: 10.1103/physrevd.96.123005

Glendenning, N. K. (2000). *Compact Stars: Nuclear Physics, Particle Physics, and General Relativity* (Astronomy and Astrophysics Library). Springer.

Kaspi, V. M., & Beloborodov, A. M. (8 de 2017). Magnetars. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 55, 261-301. doi: 10.1146/annurev-astro-081915-023329

Konar, S. (9 de 2017). Magnetic Fields of Neutron Stars. *Journal of Astrophysics and Astronomy*, 38. doi: 10.1007/s12036-017-9467-4

Lalazissis, G. A., König, J., & Ring, P. (1 de 1997). New parametrization for the Lagrangian density of relativistic mean field theory. *Physical Review C*, 55, 540-543. doi: 10.1103/physrevc.55.540

Malik, T., Alam, N., Fortin, M., Providência, C., Agrawal, B. K., Jha, T. K., ... Patra, S. K. (9 de 2018). GW170817: Constraining the nuclear matter equation of state from the neutron star tidal deformability. *Physical Review C*, 98. doi: 10.1103/physrevc.98.035804

Pais, H., & Providência, C. (2016). Vlasov formalism for extended relativistic mean field models: The crust-core transition and the stellar matter equation of state. *Phys. Rev., C94*, 015808. doi: 10.1103/PhysRevC.94.015808

Ravenhall, D. G., Pethick, C. J., & Wilson, J. R. (6 de 1983). Structure of Matter below Nuclear Saturation Density. *Physical Review Letters*, 50, 2066-2069. doi: 10.1103/physrevlett.50.2066

SOBRE OS AUTORES

AUTORES

ALESSANDRO DOSIO

PhD (*summa cum laude*) em Meteorologia e Qualidade do Ar pela Wageningen Universiteit: Wageningen, Gelderland, NL. Graduado em Física pela Università degli studi: Milano, IT. Pesquisador do Centro Comum de Investigação da Comissão Europeia – JRC, Ispra, Itália. Envolvido no Programa de Pesquisas do Clima Mundial do CORDEX – Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment. Autor do Capítulo 10 “Linking Global to Regional Climate Change” do Relatório do Grupo de Trabalho de Avaliação do IPCC. Desenvolve pesquisas relativas à produção, avaliação e análise das projeções de mudanças climáticas em escala regional (Europa e África) e suas conexões com outros modelos de impactos. Seu foco de interesse são os problemas de “downscaling”, “added value” e “bias-correction”.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6365-9473>

ALISSON ANTONIO MARTINS

Doutor em Educação, Mestre em Educação, Licenciado em Física, todos pela Universidade Federal do Paraná – UFPR. Professor Adjunto do Departamento Acadêmico de Física da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR. Atua como professor permanente e pesquisador no Programa de Pós-Graduação em Formação Científica, Educacional e Tecnológica – PPGFCET – da UTFPR e como professor colaborador e pesquisador no Programa de Pós-Graduação em Educação – PPGE da UFPR. É coordenador do Curso de Licenciatura em Física da UTFPR. É coordenador do Grupo de Estudos e Pesquisas em Ensino de Física – GEPEF-UTFPR – e integrante do Núcleo de Pesquisas em Publicações Didáticas – NPPD-UFPR. Desenvolve e orienta pesquisas na área de ensino-aprendizagem de Física, ensino-aprendizagem de Ciências, livros didáticos, formação de professores e políticas públicas.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4431-2247>

ANA MARIA MARQUES DA SILVA

Doutora em Física Nuclear, Bacharel e licenciada em Física, todos pela Universidade de São Paulo – USP. Pós-doutora pela KU Leuven (Bélgica). É professora titular da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul – PUCRS, onde coordena o Laboratório de Computação em Imagens Médicas (MEDICOM) e é pesquisadora do Instituto do Cérebro – InsCer. Atua como

docente permanente nos Programas de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (linha de Engenharia Biomédica) e em Gerontologia Biomédica. Desde 2013 é coordenadora do Programa de Residência em Física Médica da PUCRS. É editora associada da EJNMMI Physics e editora chefe da *Revista Brasileira de Física Médica*. Sua pesquisa está voltada para as áreas de imagens médicas, computação em imagens médicas multimodais, quantificação e análise cinética de imagens PET e dosimetria em Medicina Nuclear.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5924-6852>

ANA MOURA SANTOS

Doutora (1999) e Mestre (1995) em Matemática Aplicada pelo Instituto Superior Técnico de Lisboa – IST. Licenciada em Física-Matemática pela Universidade de Moscou. Professora do IST desde 1987 – primeiro no Departamento de Física e, desde 1993, no Departamento de Matemática. É atualmente Coordenadora Científica do projeto MOOC Técnico. Desenvolve investigação na área da Teoria de Operadores e Análise Funcional com aplicações à Física-Matemática. Também tem desenvolvido trabalhos em questões de ordem pedagógica, nomeadamente em projetos de e-learning na área da Matemática.

ANATOLY VINOGRADOV

PhD em Ciências Físicas e Matemáticas na especialidade de Física de Semicondutores (1974), Doutor em Física (1971), Graduado e Mestre em Ciências Físicas e Matemáticas na especialidade de Física de Estado Sólido (1968), todos pela Universidade Estatal de Saratov. Trabalhou como docente e foi chefe do Departamento de Física da Universidade estatal de Pavlodar, Casaquistão. Realizou investigações científicas no Instituto Físico-Técnico de A. F. Ioffe da Academia de Ciências da URSS, Leningrado, Rússia, no período de 1971 até 1992. Desde 1992 é docente da Universidade Agostinho Neto, Luanda, Angola. Seus interesses de pesquisa convergem para a área da Física dos semicondutores de terras raras e de óxidos, no mecanismo de condução do pentaóxido de vanádio e de bronzes de oxigénio de vanádio. Tem participação nas descobertas do efeito tensorresistivo e da transição de primeira ordem à pressão monoaxial em monossulfeto de samário.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6455-1501>

ANTÓNIO ALEXANDRE VENTURA ARAÚJO

Doutor em Geologia pela Universidade de Évora. Licenciado em Geologia pela Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, onde também

fez provas de Aptidão Pedagógica e Capacidade Científica. Realizou provas de agregação no ramo de conhecimento Ciências da Terra e do Espaço, área de especialização em Processos Geológicos. Presentemente é Professor Associado no Departamento de Geociências do Instituto de Ciências da Terra – ICT, da Universidade de Évora. Tem como principais áreas de interesse a Geologia Estrutural, Tectónica, Neotectónica, estudos de Geologia Regional e Cartografia Geológica.

ARISTEU R. P. LIMA

Doutor na área de sistemas quânticos ultrafrios, com ênfase em condensação de Bose-Einstein e gases de Fermi, pela Universidade Livre de Berlim. Mestre e bacharel em Física pela Universidade Federal do Ceará, Brasil. Seu trabalho de mestrado foi aprovado com louvor e a tese de doutorado recebeu a distinção *Magna Cum Laude*. Realizou estágio pós-doutoral na Universidade Livre de Berlim. Atuou como docente na Universidade Federal do Ceará como bolsista PNPd-Capes. Atualmente é professor da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira – UNILAB, onde foi Diretor do Instituto de Ciências Exatas e da Natureza (2013-2014) e ocupou a posição de vice-reitor *pro tempore* (2014–2017). Desde 2016 é pesquisador bolsista do programa de produtividade em pesquisa e estímulo à interiorização BPI-FUNCAP.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6171-2595>

ARLINDO MEQUE

PhD em Meio Ambiente e Ciência Geográfica pela University of Cape Town, South Africa. Mestre em Climatologia pela University of Burgundy, France. Bacharel em Meteorologia pela Universidade Eduardo Mondlane, Moçambique. É climatologista no Instituto Nacional do Moçambique – INAM. Atualmente desenvolve trabalhos como especialista em modelagem climática no Southern African Development Community (SADC) Climate Services Centre (SADC CSC). Seus trabalhos atuais envolvem a produção de informações sobre o clima para a Região SADC.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3961-7182>

BENTO ANTÓNIO FIALHO CALDEIRA

Doutor e Mestre com especialização em Sismologia pela Universidade de Évora. Licenciado e pós-graduado em Física pela Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra. Foi professor e orientador de pro-

fessores estagiários de Física e Química do Ensino Secundário e formador de professores no âmbito do projeto Minerva. Desde 1993 é professor no Departamento de Física da Universidade de Évora, onde desempenhou vários cargos de direção e coordenação. Atualmente é Vice-Presidente da Assembleia de representantes da Escola de Ciências e Tecnologia e Diretor da Villa Romana de Pisões. Participa e coordena projetos com professores e estudantes de Física do Ensino Secundário. Integra vários projetos nacionais e internacionais na área da Geofísica, em particular nos domínios da Sismologia, estrutura da litosfera e Geofísica aplicada.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4745-6972>

BRUNO CARLOS BARRADAS DIAS

Mestre em Física para o Ensino pela Universidade de Lisboa. Licenciado em Física – Ramo de Formação Educacional - Ensino da Física e Química – pela Universidade de Coimbra. Desde 2003 é docente das disciplinas de Ciências Físico-Químicas e Físico-Química do terceiro ciclo do ensino básico e Física e Química A do ensino secundário da Escola Portuguesa de São Tomé e Príncipe – CELP.

CÉSAR AUGUSTO CORDEIRO ALVES

Doutor em Física (2005) e Mestre em Física Nuclear Aplicada (1992), ambos pela Universidade de Lisboa. Licenciado em Física pela Universidade Agostinho Neto, Angola (1985). Atualmente é o chefe do Serviço de Física Médica e Radiações da Clínica Girassol, em Luanda, e Professor Associado da Faculdade de Ciências da Universidade Agostinho Neto. Desempenhou o cargo de Diretor de Diagnóstico e Terapêutica da Clínica Girassol entre 2018 e 2019. Tem como interesses de pesquisa a Dosimetria e a Proteção Radiológica em PET.

CHRISTOPHER LENNARD

PhD em Climatologia, Mestre em Zoologia, Pós-Graduado em Ciências Atmosféricas e Oceânicas e graduado em Zoologia. É pesquisador no Climate System Analysis Group, University of Cape Town, África do Sul. É interessado pelo clima regional africano e é Co-PI no projeto Atlas dos ventos para a África do Sul. É também CO-PI no projeto DECIMALS que investiga os potenciais impactos da geoengenharia solar na África. É consultor científico e líder do Coordinated Regional Downscaling Experiment – CORDEX, iniciativa africana que desenvolve estudos e modelagem dos impactos sobre o

clima africano. Atua também como consultor científico e autor do capítulo no relatório IPCC sobre a avaliação da terra e do clima na África.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6085-0320>

CONSTANÇA PROVIDÊNCIA

Doutora pela Universidade de Oxford (1989). Mestre e graduada pela Universidade de Coimbra. Professora Catedrática do Departamento de Física da Universidade de Coimbra, onde, presentemente, é diretora do Departamento de Física e Presidente da Assembleia da Faculdade de Ciências e Tecnologia. Supervisiona alunos de mestrado e doutorado. Recebeu o Prêmio Ciência da Fundação Gulbenkian em 1991 e foi nomeada Outstanding Referee of APS em 2018. Tem sido coordenadora de vários projetos financiados pela FCT e é membro das ações COST NewCompStar e PHAROS, ambas dedicadas ao estudo de estrelas de neutrões. É editora e autora da coleção Ciência e Brincar da Editorial Bizâncio e da secção Vamos Experimentar! da revista *Gazeta da Sociedade Portuguesa de Física*. Tem desenvolvido investigação nas áreas de matéria estelar densa e quente, estrelas de neutrões, diagrama de fase da QCD, transição de fase líquido-gás da matéria nuclear, energia de simetria nuclear, matéria hadrónica e de *quarks* magnetizada.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6464-8023>

DAVID M. RODRIGUES PERA

Doutor em Energia e Desenvolvimento Sustentável e Licenciado em Engenharia Física, ambos pela Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. Tem dedicado a sua atividade de investigação majoritariamente à energia solar fotovoltaica, no âmbito da matéria condensada, por meio do desenvolvimento de processos de crescimento cristalino de silício de baixo custo e elevada rentabilidade para aplicação em células solares, e no âmbito da investigação operacional, por meio de estudos de otimização de sistemas de energia.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1452-3294>

DAVID MARTINS NETO

Aluno do quinto ano de Mestrado em Engenharia Física e Tecnológica no Instituto Superior Técnico de Lisboa – IST, com ênfase em Mobilidade Elétrica. Tem como área de interesse a Física Experimental e Instrumentação.

GENITO AMOS MAURE

Doutor em Ciências Ambientais e Geográficas pela Universidade da Cidade do Cabo, África do Sul. Mestre em Atmosfera pela Universidade de Venda, na África do Sul e Licenciado em Física pela Universidade Eduardo Mondlane, em Moçambique. É Professor Auxiliar na Faculdade de Ciências da Universidade Eduardo Mondlane, onde atualmente é Chefe de Departamento de Física. É o primeiro doutor pelo IPCC Fellowship Programme, financiado pela Fundação Príncipe Alberto II do Mónaco. É membro do Conselho Diretivo da União de Físicos dos Países de Língua Portuguesa UFPLP. Tem interesse em pesquisa na área de Modelação Climática, com especial enfoque em impactos regionais da variabilidade e mudança climática.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9089-1905>

GRAÇA SILVEIRA

Doutora em Física (especialidade Geofísica), mestre em Ciências Geofísicas e Licenciada em Física, todos pela Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. É atualmente Professora Coordenadora na Área Departamental de Física do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. É também investigadora no Instituto Dom Luiz da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, onde desenvolve trabalho na área da Sismologia. O seu trabalho de investigação tem como principal objetivo a caracterização das propriedades físicas do interior da Terra, a partir da análise da propagação das ondas sísmicas.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2110-2554>

GRIGORY NIKULIN

Pesquisador e cientista líder no Swedish Meteorological and Hydrological Institute, Norrköping, Suécia – SMHI. Sua principal atividade de pesquisa relaciona-se à modelagem climática regional e global. Participa de diversos projetos europeus e internacionais relativos às informações climáticas: IMPACT2C, HEALTHY FUTURES, EUPORIAS, GLOBAQUA, FRACTAL, HELIX, IS-ENES2, CLIP-C, AfriCultuReS and CORDEX. Seu foco atual é o estudo de impactos climáticos. É responsável pela administração dos dados para o CORDEX como integrante do World Climate e Research Programme (WRCP) CORDEX Science Advisory Team (SAT).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4226-8713>

GUIDO JOAQUIM PREGO

Mestre em Geociências pela Universidade de Coimbra, Portugal e licenciado em Física pela Universidade Agostinho Neto, Angola. Desde 2012 é professor de Física, Eletricidade e Mecânica dos Fluidos II em Engenharia Mecânica no Instituto Superior Politécnico da Universidade Katyavala Bwila, em Angola. É também, desde 2017, professor de Física I, Física II e Eletrónica na Academia Militar no Instituto da Força Aérea Nacional. Interesses atuais: climatologia e alterações climáticas; divulgação das ciências; asteroides e meteoritos.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3107-5059>

HELENA PAIS

Doutorada em Física com especialidade em Astrofísica em 2013 pela Universidade do Tennessee, Knoxville, TN, USA. Actualmente é investigadora CEECIND-FCT na Universidade de Coimbra, Portugal, e co-PI de um projecto de investigação. Ao longo da sua carreira, já publicou 34 artigos em revistas internacionais e um capítulo de livro, e tem dado várias palestras convidadas em conferências e instituições internacionais. É revisora de artigos para a *Physical Review Journals*, *Physical Review Letters*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, *Physica Scripta* e *International Journal of Modern Physics E*. Tem também orientado alunos em projectos de verão, um aluno de mestrado e outro de doutoramento. Ao longo da sua carreira tem feito investigação na área da Astrofísica Nuclear, em particular nas propriedades macro e microscópicas das estrelas de neutrões, na equação de estado da matéria estelar e nuclear, nas fases de agregados leves e pesados na crosta, na matéria exótica no centro das estrelas, e no efeito do campo magnético nas propriedades deste objectos muito compactos.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7247-1950>

HORÁCIO JOÃO MATOS FERNANDES

Doutor em Engenharia Física Tecnológica pelo Instituto Superior Técnico de Lisboa, Universidade de Lisboa em 1999, Professor associado com agregação no Instituto Superior Técnico de Lisboa – IST e investigador e membro do Conselho de Administração do Instituto de Plasmas e Fusão Nuclear – IPFN, onde coordena as atividades no Tokamak ISTTOK e do grupo de Física Experimental. Em 1999 criou o e-lab, o primeiro laboratório remoto no IST e um dos poucos no mundo desenhado para a educação, com acesso livre a cerca de 20 experiências. Foi membro do Technical Advisor Panel na F4E (a agência europeia para o ITER) e é coordenador de investigação na

IAEA. Participa regularmente em atividades de divulgação científica. Os seus interesses científicos cobrem a operação em tempo real de sistemas de fusão nuclear e engenharia.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6542-7767>

INÊS RIO

Licenciada em Física pela Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. Atualmente desempenha as funções de Técnica Superior no Instituto Dom Luiz, da Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, Portugal. Investigação e interesses: Sismologia Instrumental e Observação Sismológica.

ISABEL CANCELA DE ABREU

Pós-graduada em Sistemas Sustentáveis de Energia e Licenciada em Engenharia do Ambiente, ambos pelo Instituto Superior Técnico – IST, Lisboa. Trabalhou na Associação Portuguesa de Energias Renováveis e foi consultora política no European Renewable Energy Council. Foi fundadora da Associação Lusófona de Energias Renováveis – ALER, da qual é Diretora Executiva.

IVO SENGO

Mestre (2019) e Licenciado em Física, ambos pela Universidade de Coimbra. Atualmente é estudante de doutoramento na Universidade de Aveiro. Seus interesses de investigação referem-se aos efeitos de campos magnéticos em estrelas de nêutrons e ao estudo de buracos negros, apoiado em ferramentas de relatividade numérica.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7025-1361>

IZIDINE DE SOUSA PINTO

PhD (2015) e Mestre (2011) em Meio Ambiente e Ciência Geográfica pela University of Cape Town (2015). Licenciado em Física (2008) pela Universidade Eduardo Mondlane, Maputo, Moçambique. Realizou pesquisa de pós-doutorado na University of Cape Town (2020). Atualmente é pesquisador no Climate System Analysis Group, University of Cape Town – CSAG, África do Sul. É o autor principal do Capítulo 11 do IPCC AR6 WGI's: Clima e eventos extremos em mudanças climáticas. Interessa-se pelas respostas climáticas regionais às atividades humanas na África, com foco em modelagem e projeções climáticas.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9919-4559>

JERMANO MANUEL FRANCISCO DOS SANTOS

Licenciado em Física na Especialidade de Eletrônica e Telecomunicação na Faculdade de Ciências da Universidade Agostinho Neto (2019). Funcionário do Ministério do Interior da República de Angola. Responsável pela implementação do Sistema Telemétrico em Luanda (2019-2020).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4802-1567>

JOAQUIM PEDRO KESSONGO

Mestre em Ensino de Física e graduado em Física. Atualmente é estudante de doutoramento em Física, na Universidade da Beira Interior-Portugal. Professor do Instituto Superior de Ciências da Educação da Huíla – ISCED, Angola, onde já foi Chefe de Departamento de Física. Membro efetivo da Associação Angolana de Físicos e membro co-fundador da União dos Físicos dos Países de Língua Portuguesa. Seus interesses de pesquisa abordam o potencial da atividade de radão na água do município da Bibala.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4315-0634>

JORGE MARIA GONÇALVES MAYER

Doutor em Ciências Pedagógicas na Especialidade de Física, na Universidade de Oriente em Santiago de Cuba, Cuba. (2015). Mestre em Ensino das Ciências, opção Física (2007) e Licenciado em Ciências da Educação na Especialidade de Física (1996), ambos pelo Instituto Superior de Ciências da Educação - ISCED, da Huíla (1996). Professor Associado de Mecânica Clássica no ISCED – Huíla. Chefe do Departamento de Ensino e Investigação de Ciências Exatas do ISCED (2010-2020) e Coordenador do Mestrado em Ensino das Ciências do ISCED (2017-2020).

JORGE MIGUEL DE BRITO ALMEIDA SAMPAIO

Doutor em Física Nuclear pela Universidade de Aarhus, Dinamarca. É professor auxiliar convidado da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, atuando na área de Física e Tecnologia das Radiações e de Dosimetria e Proteção Radiológica. Foi consultor na Comissão Independente para a Proteção Radiológica e Nuclear – CIPRSN e na Comissão Reguladora para a Segurança das Instalações Nucleares – COMRSIN. É investigador do Laboratório de Instrumentação e Física Experimental de Partículas – LIP, Lisboa, Portugal, no grupo Ambiente e Efeitos das Radiações no Espaço e é atualmente o coordenador do grupo de Dosimetria.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4359-493X>

JOSÉ ALMEIDA SILVA

Doutor em Física pela Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa – FCUL. Mestre em Física da Matéria Condensada e Licenciado em Física, ambos pela Faculdade de Ciências da Universidade do Porto. Investigador de pós-doutoramento no INSA-Lyon (França) e no PROMES-CNRS (França). Desde 2013 é investigador no Instituto Dom Luiz – IDL. O seu trabalho de investigação tem se focado no desenvolvimento de novos materiais e processos para aplicações fotovoltaicas, sendo o silício cristalino a sua área de especialização. Para além da energia fotovoltaica, os seus principais interesses científicos são energias renováveis, tecnologias para a transição energética, e sustentabilidade.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9052-4435>

JOSÉ FERNANDO BORGES

Doutor em Física pela Universidade de Évora (2003), com especialidade em Sismologia. Mestre em Geofísica (1996) e Licenciado em Física (1991), ambos pela Universidade de Lisboa (1991). Desde 1996 é Professor Auxiliar no Departamento de Física da Universidade de Évora (Portugal). Foi coordenador Científico do Grupo de Geofísica interna e Sismologia no período de 2008-2011. É investigador responsável de diversos projetos nos domínios da Fonte Sísmica e Perigosidade Sísmica. Investigação e interesses: Fonte Sísmica, Perigosidade Sísmica, Geofísica e Geofísica Aplicada à Arqueologia.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3847-6536>

KATE AZAR

Licenciada em Física e membro da turma de licenciatura de 2021 no Wellesley College, nos Estados Unidos. Interessa-se pela aprendizagem do português e pelo estudo do mundo lusófono. Os seus atuais interesses de investigação estão voltados para os problemas com a Física para além do Modelo Padrão. Seu trabalho mais recente centrou-se na procura de matéria negra axiônica. Fez estágio na Universidade de Cabo Verde em 2019.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4183-889X>

LILIANA DA SILVA JESUÍNO

Mestre em Educação e Tecnologias Digitais e Licenciada em Ensino da Física e Química (variante Química), ambas pela Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. Professora no Agrupamento de Escolas Escultor Francisco dos Santos e cooperante com o Instituto de Educação da Universi-

dade de Lisboa. Professora em mobilidade na Sociedade Portuguesa de Física no ano 2019/2020. Tem como áreas de interesse a Didática das Ciências e Tecnologias Digitais aplicadas à Educação e Ensino da Física e Química.

LÚCIO EMÍLIO ANTÓNIO DE CARVALHO

Mestre em Matemática e Aplicações e Licenciado em Física e Química. Professor de Física na Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de São Tomé e Príncipe – FCT-USTP. Participou na Escola de Professores no CERN em Língua Portuguesa em 2010. Desde 2012 é tutor das Masterclasses Internacionais de Física das Partículas em São Tomé e Príncipe.

LUÍS FILIPE DOS SANTOS GARCIA PERALTA

Doutor em Física de Partículas. Ex-colaborador do CERN na experiência de iões pesados Na38 e na experiência DELPHI no LEP (Large Electro-Positron colider – LEP. Professor Associado no Departamento de Física da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. Investigador na área da Física Médica e das radiações ionizantes no Ambiente. Investigador do Laboratório de Estudos dos Efeitos da Exposição ao Radão – LabExpoRad – e do Laboratório de Instrumentação e Física Experimental de Partículas – LIP, de Lisboa.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3834-1762>

LUÍS MANUEL HENRIQUES MARQUES MATIAS

Doutor em Física (1996), Mestre em Física (1992) e Graduado em Física (1984), todos pela Universidade de Lisboa e com especialização em Geofísica. Já desempenhou a função de geofísico na empresa de consultoria petrolífera Atlantic Resources Lda., Estudos e Pesquisa de Petróleo. Desde 1988 é professor da Universidade de Lisboa, inicialmente no Departamento de Física e atualmente como Professor Associado do Instituto Dom Luiz da Faculdade de Ciências, no Departamento de Engenharia Geográfica Geofísica e Energia. Em 1997, recebeu o prémio “Boa Esperança”. Coordenador português do projeto GO: Oceanografia Geofísica, financiado pela União Europeia, de 2006 a 2009 e coordenador do projeto financiado por Portugal SWITNAME: Modelagem Numérica Tectónica e Analógica de SW Iberia, 2006-2009. Áreas técnicas científicas de interesse ou atividades: Geofísica Marinha e Sismologia Experimental e Fundamental, Sismotectónica e Riscos Naturais, Questões Educacionais para o Ensino Médio.

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8086-4874>

LUIS MIGUEL TEIXEIRA GASPAR

Pós-graduado em Informática Educacional pela Universidade Católica Portuguesa e em Gestão Educacional pela Escola Superior de Educação de Lisboa. Professor de Físico-Química no Agrupamento de Escolas de Benfica.

MANUEL ANTÓNIO SALGUEIRO DA SILVA

Doutor em Física pela Universidade do Porto. É Professor auxiliar no Departamento de Física e Astronomia da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto e investigador no Centro de Investigação da Terra e do Espaço da Universidade de Coimbra (CITEUC). Interesses atuais: modelação de espectros de refletância de asteroides; estudo de meteoritos e asteroides; desenvolvimento de software para laboratórios virtuais; climatologia.

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7611-6056>

MANUEL BOGARIM BENTO DOS SANTOS

Aluno do Mestrado de Engenharia Aeroespacial no Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa – IST. Colaborador no projeto e-lab, tendo contribuído no desenvolvimento de experiências, na criação de conteúdo para a *wiki* do projeto e na manutenção dia a dia das experiências e da infraestrutura IT do laboratório. As suas principais áreas de interesse são a física experimental e a computação.

MANUEL DO SACRAMENTO DOS RAMOS PENHOR

Mestre em Clima e Ambiente Atmosférico e Licenciado em Física. Professor de Física e coordenador do curso de Física na Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de São Tomé e Príncipe – FCT-USTP. É atualmente Vice-Presidente da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de São Tomé e Príncipe – FCT-USTP. Desde 2012 é coorganizador local das Masterclasses Internacionais de Física das Partículas. É coordenador do Grupo Lusófono de Astronomia para o Desenvolvimento – PLOAD – em São Tomé e Príncipe.

MARCOS ASSUNÇÃO PIMENTA

Doutor em Ciências pelo Centre de Recherches sur la Physique des Hautes Temperatures-CNRS, França (1987). É professor titular no Departamento de Física da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) e pesquisador 1A do CNPq. Tem experiência em propriedades ópticas de

materiais, atuando principalmente nos seguintes temas: nanomateriais, grafeno, nanotubos, espectroscopia Raman, cristais bidimensionais e transições de fases estruturais. É atualmente o coordenador do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia (INCT) de Nanomateriais de Carbono e do Centro de Tecnologia em Nanomateriais (CTNano) da UFMG. É membro titular da Academia Brasileira de Ciências e da The World Academy of Sciences (TWAS). Entre 2017 e 2019 foi o presidente da Sociedade Brasileira de Física.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3389-0682>

MARCOS GOMES ELEUTÉRIO DA LUZ

Doutor em Física pela Universidade Estadual de Campinas-Unicamp (1995). É professor titular no Departamento de Física da Universidade Federal do Paraná (UFPR) e pesquisador 1B do CNPq. Foi vice-coordenador do Conselho de Assessoramento de Astronomia-Física do CNPq (2017-2019) e secretário da Sociedade Brasileira de Física (2017-2019). Atualmente é coordenador da área de Energias Renováveis da UFPR no programa PRINT-Capes e Secretário do Conselho Fiscal da UFPLP-União de Físicos de Países de Língua Portuguesa. Tem experiência nas áreas de Física Atômica e Molecular, Física Estatística e Física Matemática, com ênfase em Caos Quântico, Transporte em Sistemas Quânticos, Caminhadas Aleatórias e Física Aplicada à Biologia.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3865-2621>

MARIA DA CONCEIÇÃO ABREU

Doutora em Física Nuclear, professora catedrática aposentada da Universidade do Algarve e investigadora do Laboratório de Instrumentação e Física Experimental de Partículas – LIP. Trabalhou em Física Nuclear e Partículas, nomeadamente em experiências do CERN. Tem se dedicado à problemática do ensino da Física nas escolas básicas e secundárias e à divulgação científica, tendo promovido a criação de Centros de Ciência Viva. Atualmente é presidente da Sociedade Portuguesa de Física - SPF.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0093-7496>

MARTA ALEGRE

Pós-Graduada em Gestão Estratégica e Relações Públicas pela Escola Superior de Comunicação Social do Instituto Politécnico de Lisboa. Licenciada em Comunicação Empresarial na Escola Superior de Educação de Portalegre. Trabalhou na agência de comunicação do Brasil Group, em Amesterdão,

Países Baixos. Trabalha desde 2018 na Associação Lusófona de Energias Renováveis – ALER – onde é responsável pela comunicação e eventos.

MAVHUNGU MUTHIGE

PhD e Mestre em Ciência Ambiental pela University of the Witwatersrand in South Africa. Pesquisador do Conselho para a pesquisa científica e industrial da África do Sul. Interesses de pesquisa são a Modelagem Climática e Avaliação de Impactos. Coautor de diversas pesquisas relativas ao meio ambiente e clima.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0031-4192>

MENDITA ARNALDO UGEMBE

Mestre em Economia Monetária e Financeira (2013) e Licenciada em Economia (2010), ambos pelo Instituto Superior de Economia e Gestão. Estudante de doutoramento em Sistemas Sustentáveis de Energia da Faculdade de Ciências – Universidade de Lisboa. Desde 2014 é docente de Economia de Desenvolvimento na Faculdade de Gestão de Recursos Florestais e Faunísticos – UCM. Os seus interesses de pesquisa são na área de Economia de Energia, Pobreza Energética, Usos Produtivos de Energia, Energia, Crescimento e Desenvolvimento Económico.

MICHELE ZEMA

PhD em Mineralogia e Cristalografia (1997) e Bacharel em Química (1993). É professor e investigador na Universidade de Pavia, Itália. É *outreach* executivo da União Internacional de Cristalografia – IUCr, Reino Unido. Foi Gestor de Projeto para o Ano Internacional da Cristalografia 2014 da ONU, trabalhando em estreita colaboração com a UNESCO. Atualmente é *chair* do projeto LAAAMP e *chair* do Comitê Científico do X-TechLab (Benin). É co-fundador e coordenador da iniciativa IUCr-UNESCO Open-Lab, uma rede de escolas e laboratórios de cristalografia voltada às regiões emergentes do mundo, incluindo África, América Latina e Sudeste da Ásia. Recebeu em 2008 o Panichi Prize da Sociedade Italiana de Mineralogia e Petrologia. Seu interesse de pesquisa é o comportamento estrutural de soluções sólidas de materiais inorgânicos sob diferentes condições de temperatura e pressão, incluindo processos de ordem-desordem, hidratação desidratação *in situ* e transições de fase.

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6950-3122>

MIGUEL CENTENO BRITO

Doutor pela Universidade de Oxford, no Reino Unido. Licenciado em Engenharia Física Tecnológica pelo Instituto Superior Técnico – IST. É professor de sistemas sustentáveis de energia e energia solar na Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa e vice-diretor do Instituto Dom Luiz, centro de investigação da mesma universidade. Os seus principais interesses científicos são medição e modelação de radiação solar, energia solar fotovoltaica, sobretudo em ambiente urbano, e modelação de sistemas energéticos com elevada penetração de renováveis. É secretário da Assembleia Geral da Associação Lusófona de Energias Renováveis – ALER.

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3580-3474>

MOURAD BEZZEGHOUD

Doutor em Sismologia e Mestre (DEA) em Geofísica Interna e Geoquímica e Licenciado em Engenharia Geofísica pela Universidade Denis Diderot, Paris. Foi docente na Universidade Pierre et Marie Curie, Paris (1986-88). Fundou e liderou o Departamento de Sismologia do Centre en Astronomie, Astrophysique et Géophysique de Argel (1988-94). Foi professor convidado na École Nationale des Mines de Paris (1985), na Universidade Complutense de Madrid (1996 e 2010) e na École Normale Supérieure de Paris (2011). Desde 1998 é professor no Departamento de Física da Universidade de Évora e investigador no Centro de Geofísica de Évora (desde 1997), onde, desde 2013, ocupa o cargo de Diretor da Escola de Ciências e Tecnologia. Seus interesses de investigação são: Fonte Sísmica e Risco Sísmico; Modelos de Velocidade 3D; Movimentos Fortes; Sismotectónica e Geodinâmica; Sismologia Instrumental e Redes Sísmicas.

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4908-0422>

MZIME MURISA-NDEBELE

PhD em Biodiversidade e Biologia da Conservação (2011) pela University of the Western Cape Faculty of Natural Science, África do Sul. Mestre em Ecologia dos Recursos Tropicais (2003) e Bacharel em Ciências Biológicas, ambos pela University of Zimbabwe Faculty of Science, Zimbabwe. Tem trabalhado como pesquisadora nos últimos vinte anos junto à University of Zimbabwe (2005-2009) e Chinhoyi University of Technology (2012 a 2018) no Zimbabwe e mais recentemente, START International (a partir de 2018) como especialista nas regiões Este e Sul da África. Tem experiência com equipes colaborativas de pesquisas inter, multi e transdisciplinar, incluindo o grupo

CORDEX Africa, focadas na vulnerabilidade climática, impactos e avaliações, e resiliência urbana.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8096-2979>

NILSON MARCOS DIAS GARCIA

Doutor em Educação (2000) e Mestre em Ensino de Física (1995), pela Universidade de São Paulo – USP. Licenciado em Física (1973) pela Universidade Federal do Paraná – UFPR. Professor titular aposentado da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, onde é professor voluntário. Docente e pesquisador do Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Sociedade – PPGTE – da UTFPR e do Programa de Pós-Graduação em Educação – PPGE – da UFPR. Integrante e líder do Grupo de Estudos e Pesquisas em Ensino de Física – GEPEF-UTFPR – e integrante do Núcleo de Pesquisas e Publicações Didáticas – NPPD-UFPR. Desenvolve e orienta pesquisas sobre Livros Didáticos de Física e de Ciências, Ensino de Física, Educação Profissional e Políticas públicas de educação.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3242-994X>

OSÓRIO BELITO MANUEL DE CAVACUNDO

Mestre em Ciência e Tecnologia da Terra, da Atmosfera e do Espaço, especialidade de Geofísica Interna, pela Universidade de Évora (2015). Graduado em Ensino da Física pelo Instituto Superior de Ciências da Educação da Huíla, ISCED-Huíla (2011). É professor Assistente de Física Ambiental no ISCED-Huíla. Foi professor de Física e Sistemas Digitais no Instituto Politécnico da Humpata, e de Geofísica Aplicada no Instituto Superior Politécnico da Huíla. Suas principais áreas de interesse são os métodos sísmicos ativos e passivos e métodos eléctricos, eletricidade atmosférica, ambiente e energias renováveis.

PASCOAL ANTÓNIO MUSSUCO NAPOLEÃO

PhD em Física das Partículas (2000) e Mestre em Ciências Físicas e Matemáticas na especialidade de Física Nuclear (1995), ambos pela Universidade estatal da Bielorrússia na cidade de Minsk, Bielorrússia. Desde 2003 é docente da Universidade Agostinho Neto – UAN, Luanda, Angola. Desempenha a função de chefe do Departamento de Ensino e Investigação em Física da Faculdade de Ciências da UAN desde 2006. Desenvolve pesquisas relacionadas à Física Nuclear e Radioproteção.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8948-8257>

PATRICK EMMANUEL SOUSA

Doutor na Área da Física Médica pela Universidade do Algarve. É professor na Escola Superior de Saúde da Universidade do Algarve – Campus de Gambelas, Faculdade de Ciências Humanas e Sociais, Faro. É diretor e sócio fundador da empresa GyRAD – Controlo de Qualidade e Proteção Radiológica.

PEDRO ABREU

Doutor e Agregado pelo Instituto Superior Técnico de Lisboa – IST. Professor no Departamento de Física do IST desde 1988. O seu trabalho de tese foi realizado na experiência DELPHI, no CERN. Pesquisador no Laboratório de Instrumentação e Física Experimental de Partículas – LIP, de Lisboa. Tornou-se responsável pela Divulgação no LIP em 2003. De 2010 a 2018 presidiu a Delegação Sul e Ilhas da Sociedade Portuguesa de Física e em 2012 foi também nomeado responsável pelas relações externas do Departamento de Física do IST. É, desde o seu início (2007) até hoje, o organizador do Programa de Formação de Professores em Língua Portuguesa no CERN e das Masterclasses Internacionais em Física de Partículas em Portugal.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9973-7314>

PIEDADE MARTINS WACHILALA

Mestre em Geofísica Interna e em Engenharia Geológica, ambos pela Universidade de Évora. Atualmente é estudante de Doutorado em Ciências da Terra e do Espaço, Especialidade: Geofísica, no Instituto de Ciências da Terra da Universidade de Évora – UÉ. É professora no Departamento de Ciências da Natureza, Instituto Superior de Ciências de Educação – ISCED-Huíla, Angola. É membro da União de Físicos de Países de Língua Portuguesa – UFPLP. Seus interesses de investigação são Fonte Sísmica e Ruído Sísmico, Sismotectónica e Geodinâmica, Sismologia Instrumental e Redes Sísmicas, Análise de Solos.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5659-327X>

RITA MARIA FERREIRA DA FONSECA

Doutora e Mestre em Geologia pela Universidade de Évora. Licenciada em Geologia pela Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. É Professora Associada no Departamento de Geociências do Instituto de Ciências da Terra da Universidade de Évora. É diretora do Laboratório AmbiTerra, laboratório de análises da Universidade de Évora que engloba duas unidades: Unidade de Biogeoquímica Ambiental e Unidade de Química do Solo. Tem

como principais áreas de atividade científica: Biogeoquímica de sedimentos de albufeiras de barragem e viabilidade da sua utilização como recurso agrícola; Biogeoquímica de sedimentos marinhos; Contaminação mineira e estratégias de remediação de meios contaminados, e Geoquímica Analítica.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6389-2822>

PRUDÊNCIA MARIA BARREIRA VALENTE

Mestre em Engenharia de Materiais com Especialização em Engenharia do Ambiente e da Qualidade. Licenciada em Engenharia do Ambiente e da Qualidade. Desde 1984 é professora em Escolas Públicas em Portugal e em Escolas Portuguesas em países de expressão portuguesa, com experiência de ensino no terceiro ciclo e ensino secundário. É professora da Escola Portuguesa de São Tomé e Príncipe – CELP – nas disciplinas de Ciências Físico-Químicas, Técnicas Laboratoriais de Química, Física e Química A, Química e Física.

ROULA INGLES-LOTZ

Doutora (2011) e Mestre (2008) em Economia, ambos pela Universidade de Pretória. Licenciada em Economia pela Universidade da Macedônia, Grécia (2006). Desde 2014 é professora Associada no Departamento de Economia da Faculty of Economic and Management Sciences da Universidade de Pretória. Pesquisa sobre Economia, Energia e Ambiente, Economia Aplicada e Economia do Desenvolvimento.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7509-4687>

RÚBEN VALENTIM ALVES CARDOSO

Aluno do quinto ano de Engenharia Física Tecnológica no Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa – IST. Desenvolveu a plataforma informática AskTec, que tem por objetivo principal a aproximação dos alunos do secundário ao ensino no IST. Dedicar-se também às ações de divulgação científica, das quais se destacam a participação anual na Semana da Física. Interessa-se pela Física enquanto ciência experimental, com particular ênfase na resolução de problemas por meio da sua aplicação às tecnologias.

SANDRA DA COSTA HENRIQUES SOARES

Doutora em Física Nuclear. Professora no Departamento de Física da Faculdade de Ciências da Universidade da Beira Interior – UBI, Covilhã, Portugal. Coordenadora do Laboratório de Estudos dos Efeitos da Exposição ao

Radão – LabExpoRad. Colaboradora no Centro de Matemática e Aplicações da UBI e membro do Consórcio para as Geociências C4G. Investigadora no Laboratório de Instrumentação e Física Experimental de Partículas – LIP e do LabExpoRad.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6401-5290>

SANDRO SCANDOLO

Doutor em Física pela Scuola Normale Superiore de Pisa. Coordenador Senior e Pesquisador no Centro Internacional de Física Teórica Abdus Salam (ICTP). É um dos coautores do software aberto Quantum-Espresso, atualmente utilizado por milhares de investigadores em todo o mundo. Ocupou cargos docentes na Escola Internacional de Estudos Avançados - SISSA, Trieste, Itália e na Princeton University. Presidiu a Comissão C-13 “Física para o Desenvolvimento” da União Internacional de Física Pura e Aplicada – IUPAP. É membro da American Physical Society – APS. Seu principal interesse de investigação é a modelação computacional de materiais à escala nanométrica.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3826-4813>

SEKAZI K. MTINGWA

PhD e MSc em High Energy Theoretical Physics pela Universidade de Princeton (1976). Graduado em Física e Matemática pelo MIT (1971). Professor aposentado e pesquisador da North Carolina A&T State University e do Massachusetts Institute of Technology – MIT. É sócio principal da TriSEED Consultants, LLC nos EUA. É membro da American Physical Society – APS. Foi co-fundador do African Laser Centre, da African Physical Society, da Julius K. Nyerere University of Agriculture and Technology na Tanzânia, AIMS Ghana, da African Light Source Initiative, e do LAAAMP. Presidiu a redação do Plano Estratégico para a comunidade de utilizadores de fontes de luz síncrotron da África do Sul. Desempenhou papel importante na construção de sistemas aceleradores no Fermilab utilizados na descoberta do quark top. Foi um dos contemplados em 2017 com o Robert Wilson Prize da APS. Presidiu o Comitê Executivo do LAAAMP e a Comissão C-13 “Física para o Desenvolvimento” da União Internacional de Física Pura e Aplicada – IUPAP

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8745-005X>

SERGHEI PSAR

Doutor em Ciências Físico-matemáticas (1985) pela Universidade de Estado da Moldova, com especialização em Física dos Semicondutores e Dielétricos. Professor Catedrático da Faculdade de Ciências da Universidade

Agostinho Neto, Luanda (1992-2020). Tem quatro patentes e vasta produção acadêmica.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1656-3556>

SILVA DA CRUZ

Estudante de mestrado em Engenharia do Ambiente (especialidade Geoambiente) pela Faculdade de Engenharia da Universidade Agostinho Neto – Luanda, Angola. Professor de Física e Matemática do ensino secundário de 2007 a 2011. Desde 2012 é professor do ensino de adultos na escola secundária nº 1134. Desde 2011 trabalha na Clínica Girassol, no Serviço de Física Médica e Radiações, desenvolvendo atividades relacionadas à Proteção Radiológica, atuando no Controle de Qualidade de equipamentos de Radiodiagnóstico, de Medicina Nuclear e Gestão de Resíduos radioativos.

SÍLVIA MARIA BARBOSA CORREIA

Mestre em Física Aplicada e Licenciada em Ensino de Física e Química, ambos pela Universidade de Aveiro. Desde 2004 é docente das disciplinas de Ciências Físico-Químicas e Físico-Química do terceiro ciclo do ensino básico e Física e Química A do ensino secundário na Escola Portuguesa de São Tomé e Príncipe – CELP.

SOFIA ANDRINGA

Doutora em Física pelo Instituto Superior Técnico de Lisboa – IST (2003), com uma tese com trabalho baseado no LEP, acelerador anterior ao LHC, no CERN. Atualmente é investigadora no Laboratório de Instrumentação e Física Experimental de Partículas – LIP, em Física Experimental de Partículas e Astropartículas, participando em experiências de neutrinos e raios cósmicos, em observatórios internacionais. É co-coordenadora da Divisão de Física de Partículas da Sociedade Portuguesa de Física.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6397-9207>

SONIA SEMEDO

Doutora em Engenharia Física, com especialização em Instrumentação, pela Universidade de Coimbra, Portugal (2016). Mestre em Engenharia Física (2009) e Licenciada em Física (2008), ambos na Universidade de Aveiro, Portugal. Desde 2016 é docente e investigadora na Universidade de Cabo Verde. É Coordenadora da Comissão Científica Especializada para Ciências e Tecnologias e Secretária do Conselho para Qualidade e Avaliação da Universidade

de Cabo Verde. É membro do Conselho Diretivo da Faculdade de Ciência e Tecnologias. Os seus interesses de investigação estão direcionados para o ensino da Física, rede de sensores sem fios e monitorização da qualidade da água.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1366-9689>

SUZANETE NUNES DA COSTA

Doutora e Mestre em Geologia pela Universidade de Pádua, Itália. Licenciada em Geologia pela Universidade Agostinho Neto, Luanda, Angola (1976). Desde 1976 é docente da Universidade Agostinho Neto – UAN, Luanda, Angola, onde, durante um período de cinco anos, desempenhou a função de vice-reitora em assuntos académicos. Atualmente é diretora do Centro de Estudos de Apoio à Formação, Investigação e Extensão da UAN. Decana da Faculdade de Ciências da UAN desde 2015. Suas áreas de interesse de pesquisa representam a Geologia Geral e o desenvolvimento do ensino superior e da vida académica, cultural, científica, social e económica em Angola.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6647-6867>

TERESA MONTEIRO SEIXAS

Doutora em Física pela Universidade do Porto. É Professora auxiliar no Departamento de Física e Astronomia da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto e investigadora no Centro de Investigação da Terra e do Espaço da Universidade de Coimbra – CITEUC. Interesses atuais: estudo de meteoritos e asteroides; desenvolvimento de metodologias de avaliação online e de aprendizagem cooperativa em Física; climatologia e alterações climáticas.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0043-6926>

VICTOR NEGÎRNEAC

Aluno do quinto ano de Engenharia Física Tecnológica no Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa – IST. Foi colaborador do Núcleo de Física do Instituto Superior Técnico – NFIST – e gerente de suporte técnico da plataforma de cursos online MOOC Técnico. No âmbito da dissertação de mestrado explorou as fronteiras tecnológicas por meio da componente experimental da Computação Quântica, estendendo o estado da arte em Transmon Qubits. Interessa-se pela exploração empírica da ciência e pela vertente prática da Física.

ORCID: <https://arxiv.org/abs/2008.07411>

YOENLS PRATA ALICERCES BAHU

Mestre em Engenharia Física e graduado em ensino de Física. Atualmente é Doutorando em Física Nuclear na Faculdade de Ciências da Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal. Docente de Física Geral no Instituto Superior Politécnico da Huíla da Universidade Mandume Ya Ndemufayo, em Angola. Investigador do Laboratório de Estudos dos Efeitos da Exposição ao Radão – LabExpoRad – e do Laboratório de Instrumentação e Física Experimental de Partículas – LIP, de Lisboa.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9353-468X>

***IN MEMORIAM* DE ANDRÉ JOEL FERREIRA FREITAS** **1981 - 2021**



UMA VIDA BREVE E PLENA

Durante a elaboração destas Atas o nosso colega André Freitas faleceu a 22 de janeiro por doença súbita.

Ele foi insuperável na Organização Local da 3ª Conferência de Física dos Países de Língua Portuguesa e participou ativamente na criação da União dos Físicos dos Países de Língua Portuguesa.

ANDRÉ JOEL FERREIRA FREITAS

Nasceu em Soure, a 25 de maio de 1981.

Estudou na Escola Secundária de Soure e na Universidade de Coimbra.

Começou por lecionar na escola portuguesa de São Tomé, onde ficou até 2011 e voltou no ano letivo seguinte, tendo permanecido até o final do ano letivo 2018/2019.

Estava actualmente a ensinar no Agrupamento de Escolas da Venda do Pinheiro – Mafra.

Pai da pequena Sofia

Com saudade e agradecimento.

Os participantes da Conferência

Visando registrar as investigações desenvolvidas por pesquisadores dos países falantes do português, o presente livro compartilha as pesquisas desenvolvidas pelos participantes da 3ª Conferência de Física dos Países de Língua Portuguesa, realizada em S. Tomé, em 2019.

Tomando a Física como referência, são apresentados resultados de investigações em campos de conhecimento significativos para o universo dos autores, e questões ligadas ao Meio Ambiente, Clima, Ensino, Energia, Saúde, Nanotecnologia, novos materiais, projetos internacionais, dentre outras, são tratadas no livro com propriedade e profundidade.

Essa obra contribui para a difusão das investigações e de seus resultados e também das preocupações dos físicos dos países falantes do português com o desenvolvimento da ciência em seus países.

