

Física:



Produção de conhecimento
relevante e qualificado 3

Glécilla Colombelli de Souza Nunes
(Organizadora)

A Newton's cradle with five silver spheres hanging from thin wires against a dark grey background. One sphere on the left is in motion, having just struck or about to strike the others.

Física:

Produção de conhecimento
relevante e qualificado 3

Glécilla Colombelli de Souza Nunes
(Organizadora)

Editora chefe

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Editora executiva

Natalia Oliveira

Assistente editorial

Flávia Roberta Barão

Bibliotecária

Janaina Ramos

Projeto gráfico

Bruno Oliveira

Camila Alves de Cremo

Daphynny Pamplona

Luiza Alves Batista

Natália Sandrini de Azevedo

Imagens da capa

iStock

Edição de arte

Luiza Alves Batista

2022 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do texto © 2022 Os autores

Copyright da edição © 2022 Atena Editora

Direitos para esta edição cedidos à Atena Editora pelos autores.

Open access publication by Atena Editora



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição *Creative Commons*. Atribuição-Não-Comercial-Não-Derivativos 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0).

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores, inclusive não representam necessariamente a posição oficial da Atena Editora. Permitido o *download* da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Todos os manuscritos foram previamente submetidos à avaliação cega pelos pares, membros do Conselho Editorial desta Editora, tendo sido aprovados para a publicação com base em critérios de neutralidade e imparcialidade acadêmica.

A Atena Editora é comprometida em garantir a integridade editorial em todas as etapas do processo de publicação, evitando plágio, dados ou resultados fraudulentos e impedindo que interesses financeiros comprometam os padrões éticos da publicação. Situações suspeitas de má conduta científica serão investigadas sob o mais alto padrão de rigor acadêmico e ético.

Conselho Editorial**Ciências Exatas e da Terra e Engenharias**

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto

Profª Drª Alana Maria Cerqueira de Oliveira – Instituto Federal do Acre

Profª Drª Ana Grasielle Dionísio Corrêa – Universidade Presbiteriana Mackenzie

Profª Drª Ana Paula Florêncio Aires – Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás

Profª Drª Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná



Prof. Dr. Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Prof. Dr. Douglas Gonçalves da Silva – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Profª Drª Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará
Profª Dra. Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho
Prof. Dr. Juliano Bitencourt Campos – Universidade do Extremo Sul Catarinense
Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande
Profª Drª Luciana do Nascimento Mendes – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Marcelo Marques – Universidade Estadual de Maringá
Prof. Dr. Marco Aurélio Kistemann Junior – Universidade Federal de Juiz de Fora
Prof. Dr. Miguel Adriano Inácio – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Profª Drª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Profª Drª Priscila Tessmer Scaglioni – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Sidney Gonçalo de Lima – Universidade Federal do Piauí
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista



Física: produção de conhecimento relevante e qualificado 3

Diagramação: Camila Alves de Cremo
Correção: Maiara Ferreira
Indexação: Amanda Kelly da Costa Veiga
Revisão: Os autores
Organizadora: Glécilla Colombelli de Souza Nunes

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

F537 Física: produção de conhecimento relevante e qualificado 3 / Organizadora Glécilla Colombelli de Souza Nunes. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2022.

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

ISBN 978-65-258-0515-3

DOI: <https://doi.org/10.22533/at.ed.153220109>

1. Física. I. Nunes, Glécilla Colombelli de Souza (Organizadora). II. Título.

CDD 530

Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166

Atena Editora
Ponta Grossa – Paraná – Brasil
Telefone: +55 (42) 3323-5493
www.atenaeditora.com.br
contato@atenaeditora.com.br



Atena
Editora
Ano 2022

DECLARAÇÃO DOS AUTORES

Os autores desta obra: 1. Atestam não possuir qualquer interesse comercial que constitua um conflito de interesses em relação ao artigo científico publicado; 2. Declaram que participaram ativamente da construção dos respectivos manuscritos, preferencialmente na: a) Concepção do estudo, e/ou aquisição de dados, e/ou análise e interpretação de dados; b) Elaboração do artigo ou revisão com vistas a tornar o material intelectualmente relevante; c) Aprovação final do manuscrito para submissão.; 3. Certificam que os artigos científicos publicados estão completamente isentos de dados e/ou resultados fraudulentos; 4. Confirmam a citação e a referência correta de todos os dados e de interpretações de dados de outras pesquisas; 5. Reconhecem terem informado todas as fontes de financiamento recebidas para a consecução da pesquisa; 6. Autorizam a edição da obra, que incluem os registros de ficha catalográfica, ISBN, DOI e demais indexadores, projeto visual e criação de capa, diagramação de miolo, assim como lançamento e divulgação da mesma conforme critérios da Atena Editora.



DECLARAÇÃO DA EDITORA

A Atena Editora declara, para os devidos fins de direito, que: 1. A presente publicação constitui apenas transferência temporária dos direitos autorais, direito sobre a publicação, inclusive não constitui responsabilidade solidária na criação dos manuscritos publicados, nos termos previstos na Lei sobre direitos autorais (Lei 9610/98), no art. 184 do Código Penal e no art. 927 do Código Civil; 2. Autoriza e incentiva os autores a assinarem contratos com repositórios institucionais, com fins exclusivos de divulgação da obra, desde que com o devido reconhecimento de autoria e edição e sem qualquer finalidade comercial; 3. Todos os e-book são *open access*, *desta forma* não os comercializa em seu site, sites parceiros, plataformas de *e-commerce*, ou qualquer outro meio virtual ou físico, portanto, está isenta de repasses de direitos autorais aos autores; 4. Todos os membros do conselho editorial são doutores e vinculados a instituições de ensino superior públicas, conforme recomendação da CAPES para obtenção do Qualis livro; 5. Não cede, comercializa ou autoriza a utilização dos nomes e e-mails dos autores, bem como nenhum outro dado dos mesmos, para qualquer finalidade que não o escopo da divulgação desta obra.



APRESENTAÇÃO

A coleção “Produção de conhecimento relevante e qualificado 4” é uma obra composta por cinco capítulos que possuem como foco principal as Ciências Naturais. Os trabalhos aqui reunidos foram realizados em diferentes instituições de ensino do país e tem como linha central o desenvolvimento de novos materiais, técnicas e instrumentos, em especial, nas áreas de Biofísica, Física e Química.

Essa coleção aborda temas atuais e de interesse da comunidade científica que vão desde a aplicação de sistemas magnéticos à medicina até o impacto da COVID-19 no ensino de Física nas escolas públicas de nosso país. Sendo este último, um tema que contribuirá para que os docentes reflitam e pensem em estratégias (e metodologias) de como suprir os déficits de aprendizagem deixados pela pandemia da COVID-19.

Além disso, esta obra traz uma revisão sobre os avanços que a comunidade científica já conseguiu na produção de supercondutores $Nb_3Sn_{(s)}$ e um estudo de caso sobre o comportamento das componentes da radiação solar em um município do Rio Grande do Norte, no qual pesquisou a viabilidade de projetos que envolvem a geração de energia solar na região.

Deste modo, a obra - “Produção de conhecimento relevante e qualificado 4” - apresenta artigos interdisciplinares e que são bem fundamentados nos resultados práticos obtidos. Além do que, as discussões e os dados dos trabalhos desta coleção estão muito bem organizados e os autores conseguiram apresentar seus trabalhos de forma clara e didática.

Por fim, sabe-se o quão importante é a divulgação científica e, por isso, evidenciamos também a estrutura da Atena Editora capaz de oferecer uma plataforma consolidada e confiável para estes pesquisadores exporem e divulgarem seus trabalhos científicos.

Glécilla Colombelli de Souza Nunes

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1..... 1

BIOSUSCEPTOMETRIA AC PARA A AVALIAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS

Guilherme A. Soares

Gabriel G.A. Biasotti


Leonardo A. Pinto

Erick G. Stoppa

Lais P. Buranello

Gabriele M. Pereira

Jose R.A. Miranda

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.1532201091>

CAPÍTULO 2..... 11

CARACTERIZAÇÃO E COMPARAÇÃO DE MÉTODOS MAGNÉTICOS PARA FUTURAS APLICAÇÕES BIOMÉDICAS

Guilherme A. Soares

Erick G. Stoppa

Leonardo A. Pinto

Jose R.A. Miranda


 <https://doi.org/10.22533/at.ed.1532201092>

CAPÍTULO 3..... 26

CHEMICAL INFLUENCES AND CHALLENGES ASSOCIATED WITH ENHANCED NB3SN SUPERCONDUCTOR DEVELOPMENT

Erick Agnolin

Ana P. H. Vaniel

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.1532201093>

CAPÍTULO 4..... 35


AVALIAÇÃO DAS COMPONENTES DA RADIAÇÃO SOLAR E DO ÍNDICE DE CLARIDADE PARA CAICÓ/RN

José Augusto Ferreira Neto

Thiago Gonçalves da Silva

Everton Felipe de Souza Pinheiro

Paula Andressa Alves de Araújo

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.1532201094>

CAPÍTULO 5..... 48


A IMPORTÂNCIA DA NOTAÇÃO CIENTÍFICA E DAS UNIDADES DE MEDIDAS PARA UM APRENDIZADO MAIS SIGNIFICATIVO NO ENSINO DE FÍSICA: PROPOSTA DE INTERVENÇÃO PEDAGÓGICA

Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua

Marilene Aparecida Fernandes Pereira

José Domingos de Oliveira

Zilanda Veríssimo da Silva

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.1532201095>

SOBRE A ORGANIZADORA.....	61
ÍNDICE REMISSIVO.....	62

BIOSUSCEPTOMETRIA AC PARA A AVALIAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS

Data de aceite: 01/09/2022

Guilherme A. Soares

Instituto de Biociências de Botucatu /
Departamento de Física e Biofísica, UNESP
Botucatu, Brasil

Gabriel G.A. Biasotti

Instituto de Biociências de Botucatu /
Departamento de Física e Biofísica, UNESP
Botucatu, Brasil

Leonardo A. Pinto

Instituto de Biociências de Botucatu /
Departamento de Física e Biofísica, UNESP
Botucatu, Brasil

Erick G. Stoppa

Instituto de Biociências de Botucatu /
Departamento de Física e Biofísica, UNESP
Botucatu, Brasil

Lais P. Buranello

Instituto de Biociências de Botucatu /
Departamento de Física e Biofísica, UNESP
Botucatu, Brasil

Gabriele M. Pereira

Instituto de Biociências de Botucatu /
Departamento de Física e Biofísica, UNESP
Botucatu, Brasil

Jose R.A. Miranda

Instituto de Biociências de Botucatu /
Departamento de Física e Biofísica, UNESP
Botucatu, Brasil

RESUMO: Sistemas magnéticos vêm sendo amplamente utilizados para o estudo de nanopartículas magnéticas (NPMs), e o imageamento em tempo real é uma ferramenta importante para realizar tal estudo, que é acessível pelo método de biosusceptometria de corrente alternada (BAC), que tem como características a ausência de radiações ionizantes, baixíssima invasividade e baixo custo. Com modelos experimentais iniciais no estudo da viabilidade da aplicação do sistema no estudo de detecção, monitoramento e perfil de biodistribuição temporal de NPMs, foi possível avaliar o desempenho do sistema em relação à localização geométrica do arranjo e a imagem dinâmica da biodistribuição. A realização de testes de caracterização para o sistema BAC resultam em um contínuo desenvolvimento para o processo de reconstrução das imagens e também para desenvolvimento de novas instrumentações biomédicas.

PALAVRAS-CHAVE: Biosusceptometria de corrente alternada; nanopartículas magnéticas; instrumentação biomédica.

ABSTRACT: Magnetic systems have been widely used for the study of magnetic nanoparticles (NPMs), and real-time imaging is an essential tool to carry out such a study, which is accessible by the alternating current biosusceptometry (BAC) method, which features the absence of ionizing radiation, very low invasiveness and low cost. With initial experimental models in the study of the feasibility of applying the system in the study detection, monitoring, and temporal biodistribution profile of NPMs, it was possible

to evaluate the system's performance concerning the geometric location of the array and the dynamic image of the biodistribution. The characterization tests for the BAC system are essential to the development of the image reconstruction process and also the development of new biomedical instrumentation.

KEYWORDS: Alternate current biosusceptometry; magnetic nanoparticles; biomedical instrumental.

1 | INTRODUÇÃO

Métodos de aquisição de imagens são ferramentas fundamentais na pesquisa e na rotina clínica permitindo a visualização da anatomia e fisiologia de estruturas internas do organismo em estudo de modo não invasivo ou destrutivo. Nos últimos anos tem-se buscado o desenvolvimento de técnicas que sejam livres de radiação ionizante, como os sistemas magnéticos.

As aplicações de sistemas magnéticos vêm se tornando cada vez mais comuns, especialmente no que diz respeito às pesquisas relacionadas às nanopartículas magnéticas (NPMs) e seu potencial teranóstico onde pode ser um sistema de liberação de drogas altamente específico, utilizado também como agente de intensificação de radiação nos tratamentos por radioterapia, sistema de entrega de calor através de hipertermia magnética ou mesmo todos esses fatores atuando simultaneamente [1].

Em 2007 Sanhai [2] propôs os sete desafios relacionados à nanomedicina, destacando dois desses desafios para a utilização dos sistemas de biosusceptometria de corrente alternada (BAC), onde o primeiro é a detecção e monitoramento dessas nanopartículas *in vivo* após sua administração e o segundo o desenvolvimento de novos sistemas para a avaliação do perfil de biodistribuição temporal. Em trabalhos anteriores [3], nota-se que a BAC possui boa sensibilidade e resolução temporal suficiente para produzir sinais da distribuição dessas nanopartículas e, conseqüentemente, assegurar sua localização. Todavia, apenas a representação desses sinais pode não apresentar todas as informações necessárias, dificultando a interpretação de suas corretas localizações. Além disto, a aquisição em tempo real em diversos pontos de interesse simultaneamente torna-se um importante e promissor protocolo de medida.

Em adição, uma instrumentação capaz de produzir imagens da biodistribuição dessas nanopartículas magnéticas como o mapeamento por BAC permitirá o imageamento do marcador e/ou traçador magnético.

A busca por novas abordagens instrumentais de imagens médicas é de extrema importância para o desenvolvimento científico e tecnológico visando aplicações *in vivo* através de imagens, contribuindo para processos relacionados aos diagnósticos de câncer. Com baixo custo, forma não invasiva, livres de radiação ionizante e alta resolução temporal (tempo real).

Diferentes arranjos instrumentais para a BAC foram desenvolvidos, sendo um

desses arranjos o sistema composto por multissensores [4] utilizando 10 canais, sistema este que foi construído e utilizado no desenvolvimento deste trabalho.

Os sinais magnéticos são obtidos a partir de uma matriz contendo 10 pontos distintos (10 sensores), que são distribuídos no mesmo plano com a finalidade de gerar uma matriz de intensidade para cada tempo (*frame*).

Este trabalho piloto teve como objetivo implementar uma matriz de correção de ganho dos gradiômetros BAC multissensores, testar a correlação entre o posicionamento das NPMs no sistema e a intensidade obtida para tal posição na imagem e produzir imagens *in vivo* da distribuição de nanopartículas magnéticas a partir de BAC.

A necessidade de uma matriz de correção indica que pequenas variações durante a confecção do sistema, como o enrolamento e encaixe das bobinas resultam em alterações no sinal obtido.

2 | MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Biosusceptometria AC e geração de imagens

O sistema BAC tem seus princípios físicos estabelecidos pelo eletromagnetismo clássico, trabalhando como um transformador duplo de fluxo magnético, composto por pares de bobinas (excitação e detecção) em arranjo gradiométrico de primeira ordem. Este arranjo permite detectar a presença de material ferromagnético ou superparamagnético através da força eletromotriz induzida pelo desbalanceamento de fluxo magnético em uma das extremidades do gradiômetro.

O sistema BAC utilizado neste trabalho possui arranjo multicanal, em que vários pares de bobinas de detecção são posicionados no interior de um par de bobinas de excitação para registro simultâneo de até dez canais. A Figura 1 mostra a disposição dos sensores no arranjo montado, para este trabalho, foram utilizados 10 dos 13 canais.

Os sinais são adquiridos continuamente por amplificadores *lock-in* (*Stanford Research Systems Inc.*), digitalizados (100Hz) por placa A/D de 16 bits (*National Instruments Inc.*) e armazenados (padrão ASCII) para posterior processamento, realizados utilizando LabView® (*National Instruments, Inc.*) Matlab® (*Mathworks, Inc.*).

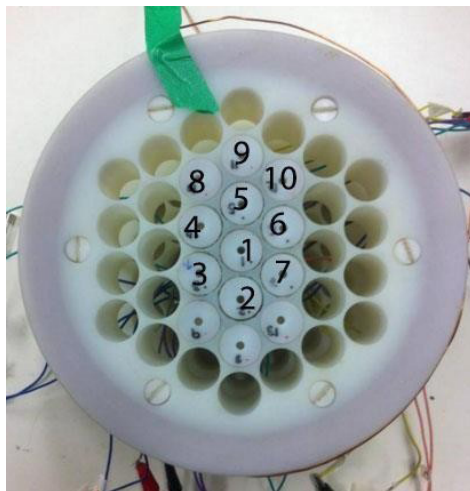


Figura 1 - BAC multisensor composto por 13 sensores.

A intensidade do sinal de cada gradiômetro foi representada em uma matriz, a qual foi interpolada (método *spline* cubica). Ao repetir este processo para cada conjunto de pontos, obteve-se um vídeo representando a movimentação do material traçador ao longo do tempo.

2.2 Nanopartículas Magnéticas

Como elementos traçadores foram selecionadas NPMs de ferrita de manganês ($MnFe_2O_4$) por possuir alta susceptibilidade magnética (superparamagnética) e, portanto, ser facilmente detectada pela BAC. As NPMs foram sintetizadas por co-precipitação [5] e recobertas com citrato. Possuíam diâmetro médio de 13 ± 4 nm e saturação de magnetização de 264 emu/cm^3 (58 emu/g). Na ocasião dos experimentos as nanopartículas se encontravam em solução fisiológica (23 mg/ml) contendo aproximadamente $1,7 \cdot 10^{15}$ partículas/ml [6].

2.3 Procedimentos experimentais

Para a realização das primeiras imagens dinâmicas relacionadas à NPMs utilizando o sistema desenvolvido, foram propostos os seguintes testes para atingir os objetivos definidos:

2.3.1 Calibração da BAC multisensores

Para assegurar resposta planar homogênea da BAC multisensores, um recipiente plástico contendo 0,5ml da solução de NPMs foi posicionado sobre cada sensor e uma aquisição de dez segundos foi feita. A seguir foram calculadas as imagens correspondentes à fonte fixa em frente a cada sensor.

Utilizando o valor máximo de pixel em cada imagem foi montada a matriz de correção e de ganho de cada sensor.

2.3.2 Distribuição *in vivo*

Após aprovação do Comitê de Ética (Protocolo nº 802-CEUA), um rato adulto (*Rattus norvegicus albinus* – linhagem Wistar), macho, 289,4g de massa proveniente do Biotério central da UNESP/Botucatu, foi submetido à cirurgia de canulação de veia femoral para a administração endovenosa das NPMs, sob efeito de anestesia (uretano a 99% - 1,5 mg/kg).

Posteriormente o animal foi posicionado em decúbito ventral sobre o sistema BAC multisensores 20 minutos antes do início da coleta de dados para estabilização do sistema. Em relação à Figura 1, a cabeça do animal foi posicionada sobre o sensor 2 e o local de administração no sensor 9.

A administração do fluido nanoparticulado ocorreu de modo contínuo a 0,05ml/s por 10s.

Finalizada a administração, a coleta de dados se estendeu por duas horas e em seguida o animal, ainda anestesiado, sofreu eutanásia por decapitação.

3 | RESULTADOS

3.1 Calibração

As Figuras 2 e 3 mostram, respectivamente, os histogramas de intensidade obtidos com o posicionamento do recipiente contendo material nanoparticulado frente a cada sensor do sistema, antes e após a implementação da matriz de correção.

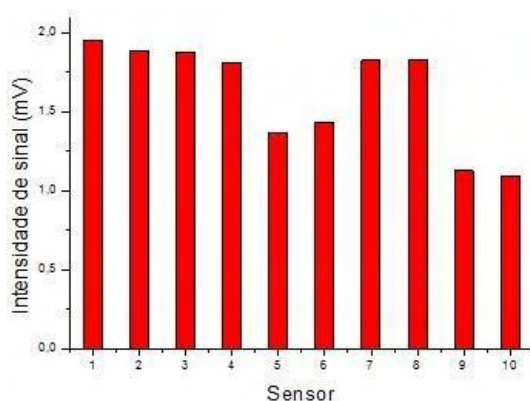


Figura 2 - Histograma para os sensores utilizados.

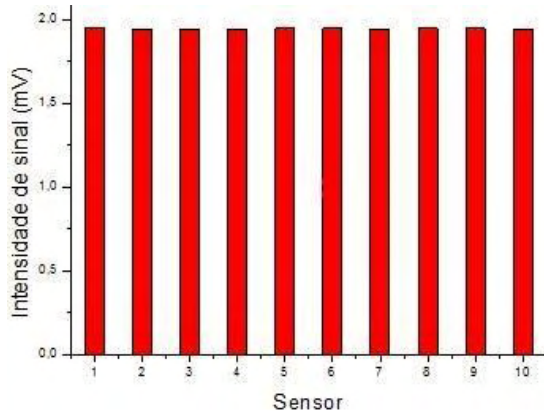


Figura 3 - Histograma utilizando a matriz de correção.

Estas correções refletem nas imagens produzidas pelo sistema, conforme as Figuras 4 e 5, que mostram a resposta de cada sensor antes e depois da matriz de correção, respectivamente.

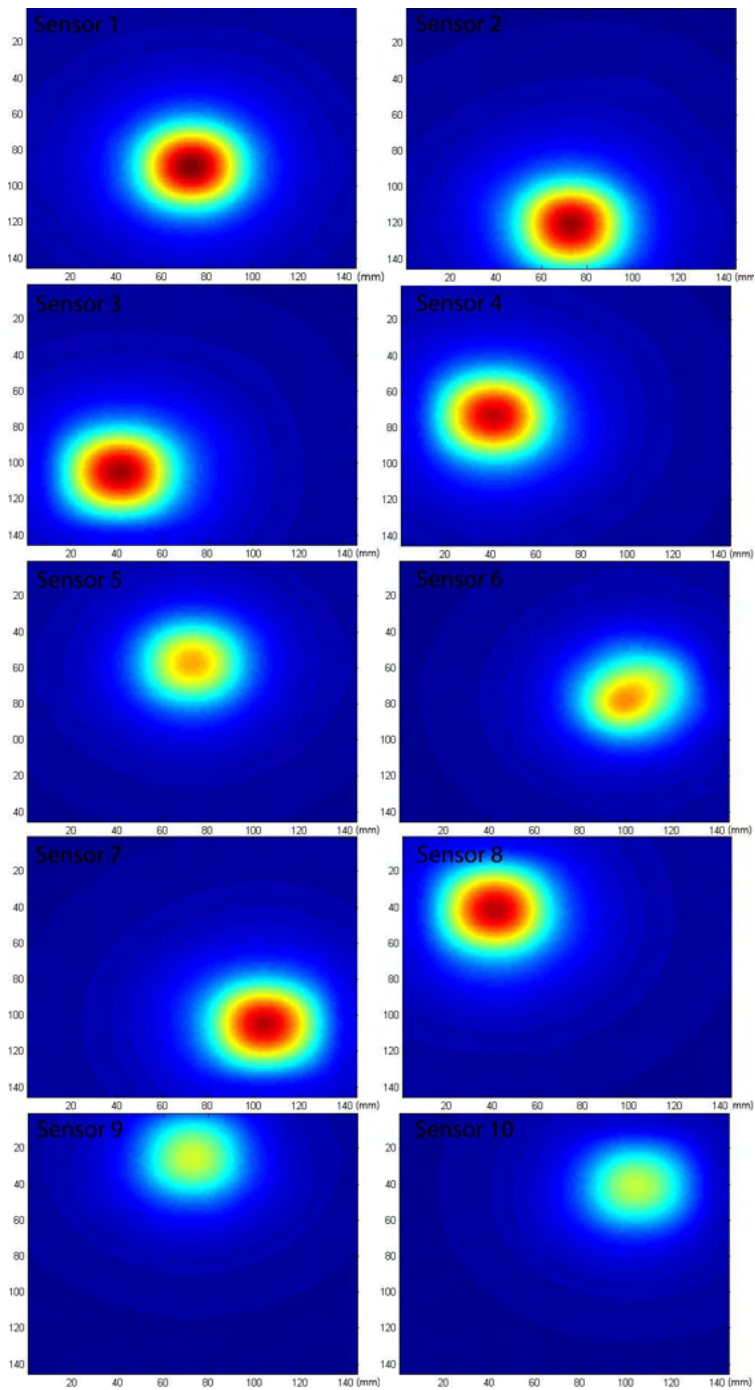


Figura 4 - Imagem para cada sensor sem utilizar a matriz de correção.

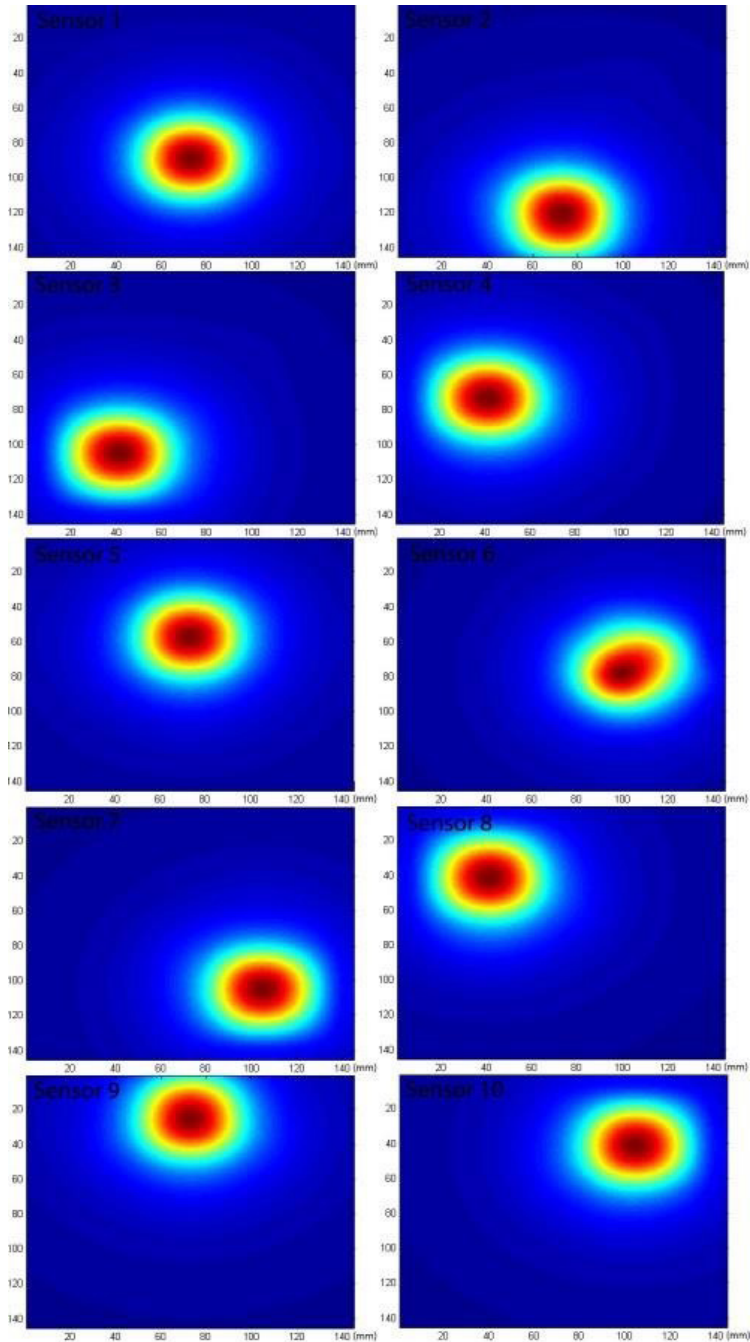


Figura 5 - Imagem para cada sensor utilizando a matriz de correção.

3.2 Distribuição *in vivo*

Na figura 6, quatro quadros das imagens dinâmicas foram selecionados para

determinar se o sistema é capaz de diferenciar órgãos alvo pela intensidade de sinal na imagem.

Em $t_0=0s$, momento anterior à administração das NPMs, a imagem é representada por uma área de ruído, correspondente ao animal em repouso sobre o sistema no qual nenhum sinal significativo é detectado. Já em $t_1=30s$, logo após a administração é verificado um aumento de intensidade entre a parte superior e média do plano, que corresponde a entrada das NPMs no animal e posterior distribuição pelos órgãos.

Nas imagens finais ($t_2=1h$ e $t_3=2h$) as NPMs concentram-se na altura do fígado e outros órgãos adjacentes do animal, distribuindo-se ao longo do plano de medida.

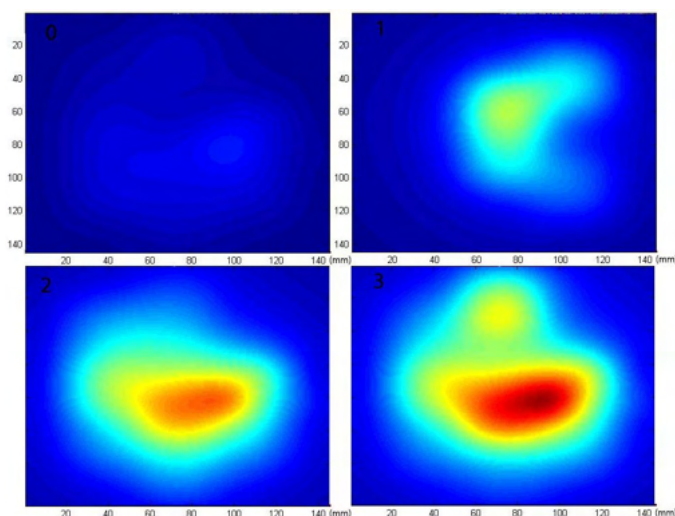


Figura 6 - Biodistribuição dinâmica das NPMs utilizando 10 canais para quatro momentos a partir da administração.

4 | DISCUSSÃO

A utilização do sistema multisensores para o imageamento de NPMs se mostrou eficiente em ambos os testes propostos.

No teste *in vitro*, a matriz de correção foi utilizada para corrigir a intensidade de cada sensor, melhorando assim a qualidade da imagem reconstruída. Além de verificar que a BAC é sensível a pequenas quantidades de NPMs, este teste permitiu identificar a posição dos sensores no plano da imagem, importante para a correlação anatômica na análise *in vivo*.

No estudo sobre o perfil de biodistribuição temporal de NPMs, o sistema detectou a presença de material magnético no plano de medida conforme a administração ocorria e também sua distribuição nos órgãos de interesse, como fígado e rins.

Os quadros selecionados para representar o desempenho do sistema mostram o

momento anterior à administração ($t_0=0s$), em que não há presença de sinal, o aumento inicial de intensidade à partir da chegada das NPMs ($t_1=30s$) no sensor mais próximo ao local da administração (sensor 9) e sua distribuição para os órgãos do animal, principalmente o fígado, que acumula a maior parte do material, que são apresentados uma hora (t_2) e duas horas(t_3) após a administração.

Todavia, a caracterização do sistema em relação à concentração de material magnético, distância fonte sensor, resolução, estabilidade e outros, faz-se necessária para o desenvolvimento do processo de reconstrução das imagens dinâmicas, além do estudo de outros métodos possíveis para um aumento na relação sinal ruído.

5 | CONCLUSÕES

A BAC é sensível para detectar NPMs *in vivo* e *in vitro* em concentrações de 23 mg/ml. Também foi possível produzir imagens planares desta distribuição à taxa de 100 Hz de amostragem, bem como corrigir estas imagens para melhor uniformidade de imagem.

Conhecendo-se a posição dos sensores, foi possível avaliar a distribuição *in vivo* de nanopartículas magnéticas administradas via endovenosa, de modo que o sistema BAC pode ser usado para estudar o perfil de biodistribuição temporal de NPMs.

REFERÊNCIAS

1. Lukianova-Hleb, E.Y.; Ren, X.; Sawant, R.R.; Wu, X.; Torchilin, V.P.; Lapotko, D.O. On-demand intracellular amplification of chemoradiation with cancer-specific plasmonic nanobubbles. *Nature medicine* **2014**, *20*, 778-784.
2. Sanhai, W.R.; Sakamoto, J.H.; Canady, R.; Ferrari, M. Seven challenges for nanomedicine. *Nature nanotechnology* **2008**, *3*, 242-244.
3. Quini, C.C.; Matos, J.F.; Próspero, A.G.; Calabresi, M.F.F.; Zufelato, N.; Bakuzis, A.F.; Baffa, O.; Miranda, J.R.A. Renal perfusion evaluation by alternating current biosusceptometry of magnetic nanoparticles. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* **2015**, *380*, 2-6.
4. Corá, L.; Andreis, U.; Romeiro, F.G.; Américo, M.; Oliveira, R.B.d.; Baffa, O.; Miranda, J. Magnetic images of the disintegration process of tablets in the human stomach by ac biosusceptometry. *Physics in Medicine & Biology* **2005**, *50*, 5523.
5. Branquinho, L.C.; Carrião, M.S.; Costa, A.S.; Zufelato, N.; Sousa, M.H.; Miotto, R.; Ivkov, R.; Bakuzis, A.F. Effect of magnetic dipolar interactions on nanoparticle heating efficiency: Implications for cancer hyperthermia. *Scientific reports* **2013**, *3*, 1-11.
6. Nunes, A.D.; Ramalho, L.S.; Souza, A.P.; Mendes, E.P.; Colugnati, D.B.; Zufelato, N.; Sousa, M.H.; Bakuzis, A.F.; Castro, C.H. Manganese ferrite-based nanoparticles induce ex vivo, but not in vivo, cardiovascular effects. *International journal of nanomedicine* **2014**, *9*, 3299.

CARACTERIZAÇÃO E COMPARAÇÃO DE MÉTODOS MAGNÉTICOS PARA FUTURAS APLICAÇÕES BIOMÉDICAS

Data de aceite: 01/09/2022

Guilherme A. Soares

Instituto de Biociências de Botucatu /
Departamento de Física e Biofísica, UNESP
Botucatu, Brasil

Erick G. Stoppa

Instituto de Biociências de Botucatu /
Departamento de Física e Biofísica, UNESP
Botucatu, Brasil

Leonardo A. Pinto

Instituto de Biociências de Botucatu /
Departamento de Física e Biofísica, UNESP
Botucatu, Brasil

Jose R.A. Miranda

Instituto de Biociências de Botucatu /
Departamento de Física e Biofísica, UNESP
Botucatu, Brasil

RESUMO: A detecção de materiais magnéticos e a obtenção de imagens magnéticas são vertentes relevantes nos meios científico e comercial. A busca por métodos alternativos aumentou de forma significativa ao longo do tempo, visto que, técnicas como Dispositivo de Interferência de Supercondutores Quânticos (SQUID), Imageamento de Partículas Magnéticas (MPI) e Imageamento por Ressonância Magnética (MRI), apesar de, fornecer alta qualidade de imagens e detecção e serem livres de radiação ionizante, apresentam-se como métodos de elevado custo operacional, tanto para implementação, quanto na manutenção, exigindo ambiente blindado

para seu funcionamento. A Biosusceptometria de corrente alternada (BAC) e a técnica híbrida Biosusceptometria de corrente alternada acoplada com magnetorresistores anisotrópicos com três eixos de detecção BAC-AMR 3D oferecem maior viabilidade para detecção de materiais magnéticos *in vitro* e *in vivo* para aplicações didáticas e de diagnóstico, pelo fato de ambas as técnicas se apresentarem com custo muito reduzido, serem livres de radiação ionizante e sem a necessidade de planejamento para ambiente blindado. No trabalho foi realizado uma caracterização e comparação entre os métodos BAC e BAC-AMR 3D, a fim de, ao se analisar os testes realizados, associar as técnicas com diferentes metodologias e finalidades. Para obtenção dos resultados foram realizados testes de sensibilidade tangencial, axial, determinação da curva de calibração, simulação de contração *in vitro*, análise do comportamento de resposta frente a variação de frequências e escaneamento de uma matriz. O sistema BAC apresentou maior sensibilidade e intensidade de sinal, sendo mais relevante para medidas pontuais *in vitro* e *in vivo*, onde a posição do marcador magnético seja previamente conhecida e exige maior sensibilidade, por outro lado, a possibilidade de análise de mais duas componentes de detecção torna a técnica BAC-AMR 3D ideal para medidas que necessitem de maiores informações espaciais sobre o posicionamento do marcador magnético em determinado campo de visão (fov) bem definido. A partir dos resultados foi possível concluir que as técnicas foram eficientes para tal detecção, podendo ser escolhidas de acordo com a finalidade da metodologia a ser aplicada.

Com o intuito de se obter imagens quantitativas de maior qualidade, a exploração do sistema BAC-AMR 3D mostra-se promissor, já que, o fornecimento de mais duas componentes de detecção, oferecem maior sustentabilidade para tal resolução.

PALAVRAS-CHAVE: Biomagnetismo, Técnicas Biomagnéticas, Comprimido Magnético, Anisotropia, Gradiômetro, Magnetoresistores, Imagens Quantitativas.

ABSTRACT: The detection of magnetic materials and the acquisition of magnetic images are relevant aspects in scientific and commercial circles. The search for alternative methods has increased significantly over time, since techniques such as Quantum Superconducting Interference Device (SQUID), Magnetic Particle Imaging (MPI), and Magnetic Resonance Imaging (MRI), despite providing high-quality imaging and detection and being free from ionizing radiation, are methods of high operational cost, both for implementation and maintenance, requiring a shielded environment for their operation. Alternating Current biosusceptometry of (ACB) and the hybrid technique of biosusceptometry of alternating current coupled with anisotropic magnetoresistors with three detection axis ACB -AMR 3D offer greater feasibility for detection of magnetic materials in vitro and in vivo for didactic and diagnostic applications, by the fact that both techniques have a very low cost, are free from ionizing radiation and without the need for planning for a shielded environment. Characterization and comparison were carried out between the AC B and ACB-AMR 3D methods, in order to, when analyzing the tests performed, associate the techniques with different methodologies and purposes. To obtain the results, tests of tangential and axial sensitivity, determination of the calibration curve, simulation of in vitro contraction, analysis of the response behavior in the face of frequency variation, and scanning of a matrix were performed. The ACB system presented greater sensitivity and signal intensity, being more relevant for punctual measurements in vitro and in vivo, where the position of the magnetic marker is previously known and requires greater sensitivity, on the other hand, the possibility of analyzing two more components of detection makes the ACB-AMR 3D technique ideal for measurements that need more spatial information about the positioning of the magnetic marker in a given field of view (FOV) well defined. From the results it was possible to conclude that the techniques were efficient for such detection, being able to be chosen according to the purpose of the methodology to be applied. In order to obtain higher quality quantitative images, the exploration of the ACB-AMR 3D system is promising, since the provision of two more detection components offers greater sustainability for such resolution.

KEYWORDS: Biomagnetism, Biomagnetic Techniques, Anisotropy, Gradiometer, Magnetoresistors, Quantitative Imaging.

1 | INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de sistemas para a detecção de materiais magnéticos e a obtenção de imagens magnéticas possui grande relevância (Americo *et al.*, 2010) (Fagaly, 2006). Técnicas como o Imageamento de Partículas Magnéticas (MPI), Dispositivo de Interferência de Supercondutores Quânticos (SQUID) e Imageamento por Ressonância Magnética (MRI) são muito bem estabelecidas, não invasivas e livres da radiação ionizante, porém, exigem a necessidade de salas blindadas, elevado custo de implementação e

manutenção dos equipamentos (Saritas *et al.*, 2013). Os sistemas de Biosusceptometria de corrente alternada (BAC) e o sistema híbrido de Biosusceptometria de corrente alternada acoplado com sensores AMRs de três eixos de detecção (BAC-AMR 3D) são exemplos de sistemas de baixo custo de implementação e manutenção, sem a necessidade de salas blindadas, não invasivos e livres de radiação ionizante, sendo caracterizados por sua versatilidade.

O sistema BAC tem seu princípio físico de funcionamento baseado na lei de indução de Faraday (Agostinho, 2008). Os sensores BAC são compostos por um par de bobinas de detecção e um par de bobinas de indução. A BAC é amplamente utilizada em estudos envolvendo o trato gastrointestinal (TGI), farmacotécnica, análises de biodistribuição de nanopartículas magnéticas, tempo de circulação de nanopartículas magnéticas na corrente sanguínea e obtenção de imagens magnéticas (Corá *et al.*, 2003) (Próspero, 2015) (Soares, 2018). Os magnetorresistores (MR) são sensores magnetorresistivos que possuem a propriedade de alterar a sua resistividade na presença de um campo magnético AC ou DC. Ligas de níquel - aço, *permalloy*, apresentam grande variação de resistividade (aproximadamente 5%), sendo muito utilizados para fabricação de sensores magnetorresistivos. A resistividade aumenta de forma diretamente proporcional com a intensidade do campo magnético. Os magnetorresistores anisotrópicos (AMR) são sensores constituídos de um filme fino de níquel-ferro (*permalloy*) depositado sobre um substrato de silício, sendo padronizado como uma faixa resistiva (Lenz *et al.*, 1990). Seu princípio de funcionamento é baseado na resistência elétrica do filme, que pode ser modulada pela aplicação de um campo magnético na direção de sua magnetização inerente. Os sensores magnetorresistivos anisotrópicos dependem da direção do campo magnético aplicado.

A técnica híbrida BAC-AMR 3D, desenvolvida por Paixão e colaboradores (Paixão, 2009) consiste na junção da técnica BAC com a implementação de sensores AMRs. Nesta técnica, a bobina detectora do sistema BAC é substituída por um par de sensores AMRs com três eixos de detecção com o intuito de aprimorar os sistemas de detecção BAC e BAC-AMR convencional (Paixão *et al.*, 2012). Ao se obter mais dois eixos de detecção com a implementação dos sensores AMRs, é possível extrair informações magnéticas em três eixos com diferentes contribuições, o que é importante em relação à possível determinação do posicionamento do material ou marcador magnético em um campo de visão (FOV) (Paixão *et al.*, 2010).

Apesar de uma gama de técnicas já consolidadas, ainda existe a necessidade de exploração e caracterização dos métodos biomagnéticos já existentes, além do desenvolvimento de novos métodos que possam agregar cada vez mais na detecção de materiais magnéticos e obtenção de imagens. A junção de uma ou mais técnicas de princípios distintos é um caminho muito promissor para a evolução dos métodos. No trabalho realizado foi explorado a caracterização e comparação dos sensores BAC-monocanal e BAC-AMR 3D, relacionando as melhores aplicabilidades para cada metodologia.

2 | OBJETIVO

Caracterização e comparação dos sensores BAC-monocanal convencional (i.e., com bobinas de detecção magnética) e o sensor BAC-AMR 3D equipada com sensores do tipo AMR de três dimensões como sensores magnéticos. Estabelecer as melhores aplicações para cada tipo de sensor a partir dos resultados obtidos. Os objetivos específicos foram:

- Caracterização da curva de calibração utilizando diferentes concentrações de comprimidos magnéticos;
- Teste de sensibilidade tangencial nos eixos x e y;
- Teste de sensibilidade axial no eixo z;
- Teste de sensibilidade axial no eixo z para diferentes frequências de excitação;
- Simulação de contração *in vitro*;
- Escaneamento de uma matriz 100x100 mm;
- Comparação dos resultados e aplicabilidade das técnicas;

3 | MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Biosusceptometria de corrente alternada (BAC)

O sistema funciona como um transformador duplo de fluxo magnético com seus pares de bobinas arranjados de forma coaxial em configuração gradiométrica de primeira ordem (Corá *et al.*, 2003). Utilizando esse arranjo gradiométrico, os campos magnéticos são subtraídos deixando o sensor com um menor ruído e maior sensibilidade (Moraes *et al.*, 2003). O par de bobinas mais distante da amostra atua como referência e o mais próximo da amostra como detecção. O *lock in* (SR830, Stanford Research Systems, Sunnyvale, EUA) gera um sinal senoidal, o qual é amplificado por um amplificador externo de potência (TIP 800, Ciclotron, Barra Bonita, Brasil) e aplicado nas bobinas de indução, gerando um fluxo magnético nas bobinas de detecção. A presença de materiais magnéticos próximos a bobina detectora resulta no desbalanceamento do fluxo total do sistema, gerando um sinal elétrico. Os sinais elétricos gerados nas bobinas de detecção retornam ao *lock in*, que é responsável por processar o sinal de saída e convertê-lo em um sinal contínuo DC. O sinal detectado é proporcional à quantidade de material magnético, e inversamente proporcional a distância entre material magnético e bobina de detecção (Próspero *et al.*, 2019). Posteriormente o sinal é registrado online (LabVIEW 2010, National Instruments, Austin, EUA) digitalizado pela placa de aquisição A/D *National Instruments* (NI DAQPad-6015) e armazenado em uma interface computacional.

3.2 Biosusceptometria AC acoplada com magnetorresistores anisotrópicos com três eixos de detecção magnética (BAC-AMR 3D)

O sensor BAC-AMR 3D é composto de um par de bobinas de excitação magnética conectadas em série e ligadas a um amplificador de potência e amplificador *lock-in*. A detecção do sistema é dada pela substituição das bobinas BAC convencionais por um par de AMRs com três eixos de detecção magnética (HMC1023, Honeywell Inc., USA). O par bobina/AMR mais próximo da amostra foi empregado para detecção e o mais distante da amostra como referência. O equipamento testado neste trabalho foi desenvolvido e apresentado na tese de doutorado por Paixão et al. em 2009 (Paixão 2009). Neste trabalho o sistema foi utilizado apenas com excitação, visando a comparação frente ao sensor BAC monocanal.

O sinal AC medido pelos sensores magnéticos são convertidos para DC usando os conversores de tensão true rms. O sinal é gravado online através do software (LabVIEW 2010, National Instruments, Austin, EUA), e digitalizado pela placa de aquisição A/D *National Instruments* (NI DAQPad-6015), adquirido com uma frequência de aquisição de 20 kHz e armazenados em uma interface computacional para posterior processamento.

3.3 Desenvolvimento dos fantasmas

Os marcadores magnéticos utilizados para a realização das medidas magnéticas foram constituídos de micropartículas de ferrita de manganês ($MnFe_2O_4$) (Ferroxcube, El Paso, EUA) com permeabilidade magnética (Baffa *et al.*, 1995) $\mu_r = 3000$, adquirida em pedaços, triturada e peneirada para obter o tamanho entre 53 e 75 μm . Os fantasmas foram confeccionados em forma de comprimido magnético. Com o intuito de homogeneizar a amostra, a celulose microcristalina, que atua como agente estabilizante foi utilizado como excipiente. O comprimido magnético padrão utilizado nas medidas magnéticas possui as seguintes características, de acordo com a tabela 1.

Características	Comprimido magnético padrão
Diâmetro (mm)	12
Peso referente a ferrita em pó (mg)	300
Peso referente ao excipiente (mg)	200
Peso total (mg)	500

Tabela 1. Características do comprimido magnético padrão.

3.4 Medidas in vitro

O fantoma foi fixado na extremidade de uma haste rígida de acrílico, presa a mesa três eixos, evitando a aproximação da mesa no sensor e minimizando os ruídos gerados

pela aproximação de outros materiais. A corrente do sistema BAC-monocanal e BAC-AMR 3D foi monitorada em tempo real durante os experimentos para garantir os 150 mA na excitação de ambas, utilizando o multímetro Tektronix (TX3 True RMS Multimeter).

3.4.1 Curva de calibração

Comprimidos magnéticos com diferentes concentrações variando de 50 mg até 300 mg de ferrita foram posicionados a 2 mm do centro do sensor. O teste foi realizado com o objetivo de avaliar a sensibilidade dos sistemas.

3.4.2 Teste de sensibilidade tangencial nos eixos x e y

O teste de sensibilidade tangencial foi realizado com o intuito de avaliar a resposta do sensor BAC-AMR 3D e BAC-monocanal quando submetidos à passagem do comprimido magnético em diferentes eixos do plano de detecção. O comprimido magnético padrão foi posicionado a uma distância de 5 mm do centro da superfície de detecção. A amostra percorreu de -50 a 50 mm à um passo de 1 mm, sendo que 0 mm coincide com o centro do sensor. As varreduras foram feitas em x e em y.

3.4.3 Teste de sensibilidade axial eixo z

O teste de sensibilidade axial foi realizado com o objetivo de observar a resposta de cada sensor frente a aproximação da amostra no sentido axial, denominado eixo z. O comprimido magnético padrão foi posicionado a 5 mm e afastado do centro do sensor até 55 mm com passo de 1 mm.

3.4.4 Varredura de frequências

Foram realizadas aproximações axiais, eixo z com o comprimido magnético padrão à 5 mm do centro do sensor. A corrente foi mantida constante em 150 mA e a frequência foi variada em 1 kHz, 5 kHz, 10 kHz e 15 kHz com a intenção de observar a resposta de intensidade de sinal frente a cada uma das frequências escolhidas.

3.4.5 Simulação de contração in vitro

Foi desenvolvida uma rotina para aproximar o comprimido magnético padrão em três frequências distintas. A distância mínima da amostra até o centro do sensor foi de 5 mm, sendo afastado até 100 mm, distância em que não se identifica mais sinal da amostra. O sinal foi obtido no domínio do tempo, e aplicado a transformada rápida de Fourier (FFT) transformando o sinal em domínio de frequência. As frequências dominantes foram analisadas e identificadas.

3.4.6 Escaneamento – BAC-AMR 3D e BAC monocanal

O escaneamento foi realizado através de uma matriz 100x100 mm com passo de 1 mm e tempo de aquisição igual a 5 s por ponto, mantendo o eixo z fixo e variando os eixos x e y. O comprimido magnético padrão foi posicionado no centro dos sensores, considerando esta posição como o centro da matriz. Com o escaneamento será reconstruída uma imagem magnética referente a intensidade de sinal em cada posição.

3.4.7 Quantificação dos dados obtidos

Todos os dados foram processados utilizando software MATLAB (MatLab, Mathworks Inc., Natick, USA) e as figuras foram obtidas através do software GraphPad Prism 7.05 (GraphPad Software, La Jolla, Califórnia, EUA).

4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Curva de calibração

A figura 1 representa os resultados obtidos através da curva de calibração utilizando comprimidos de 50, 100, 150, 200, 250 e 300 mg de ferrita. O gráfico da figura 1A refere-se ao sistema BAC-monocanal e o gráfico da figura 1B refere-se ao sistema BAC-AMR 3D.

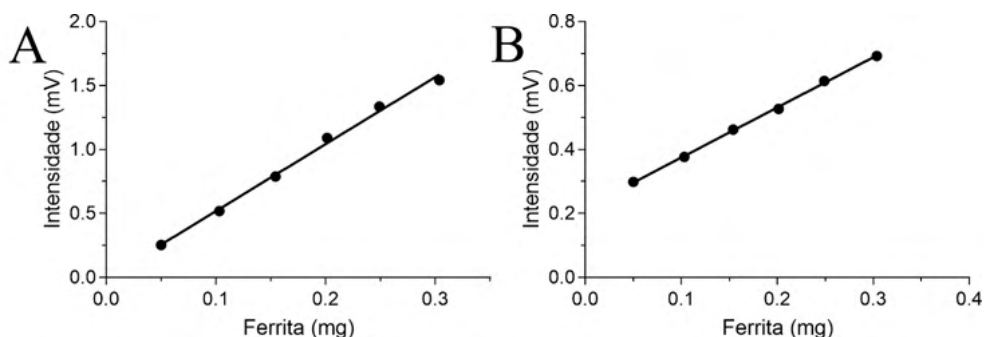


Figura 1. **(A)** Curva de calibração referente ao sistema BAC-monocanal **(B)** Curva de calibração referente ao sistema BAC-AMR 3D.

Para o sistema BAC-AMR 3D foi utilizado apenas o sinal que corresponde ao eixo z, já que, no posicionamento axial em z, não se observa influência das componentes x e y do sensor. Observa-se a linearidade de resposta para ambos os sensores, evidenciando a resposta linear ao variar-se a concentração. Entretanto, o sistema BAC-AMR 3D apresentou uma amplitude de sinal menor (aproximadamente 50%) que o da BAC-monocanal. O coeficiente de correlação de Pearson, R para o sistema BAC-monocanal foi de 0,9955 e para o BAC-AMR 3D foi de 0,999. Ambos os sistemas apresentam alta correlação e baixa

dispersão. Neste caso o BAC-AMR 3D apresentou melhor correlação linear.

4.2 Teste de sensibilidade tangencial eixos x e y

O gráfico 2A representa a passagem no eixo x do comprimido magnético para o sensor BAC-monocanal e o gráfico 2-B representa a passagem no eixo x para o BAC-AMR 3D. A figura 3 refere-se aos resultados obtidos para a passagem do comprimido magnético no eixo y, na qual a figura 3-A corresponde ao sistema BAC-monocanal e a figura 3-B ao sistema BAC-AMR 3D.

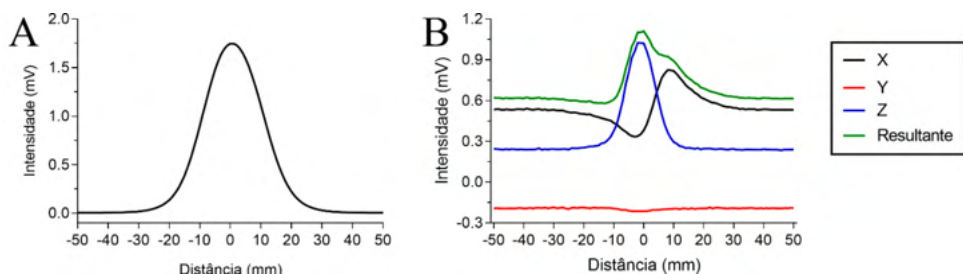


Figura 2. **(A)** Sensibilidade tangencial no eixo x BAC-monocanal. **(B)** Sensibilidade tangencial no eixo x BAC-AMR 3D.

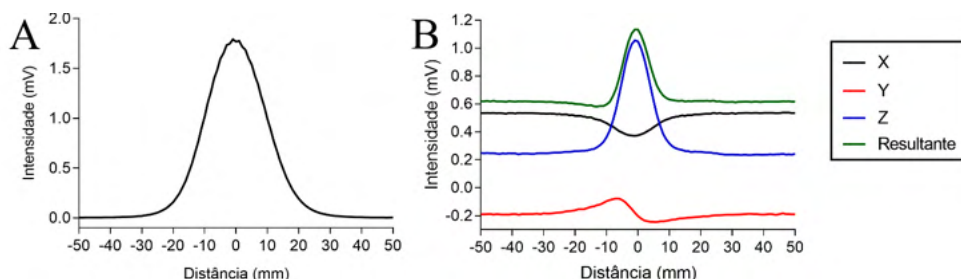


Figura 3. **(A)** Sensibilidade tangencial no eixo y BAC-monocanal. **(B)** Sensibilidade tangencial no eixo y BAC-AMR 3D.

A partir dos resultados é possível observar um único padrão para o sistema BAC-monocanal, referente à passagem do comprimido magnético no centro do sistema, expresso como uma gaussiana com resposta de intensidade maior do que o observado nos dois gráficos referentes ao sistema BAC-AMR 3D. O sistema BAC-monocanal obteve uma maior intensidade de sinal para o mesmo comprimido magnético no centro do sensor, porém apresenta um perfil idêntico em relação as passagens em x e em y, o que torna impossível a identificação de cada um dos eixos e a identificação da localização espacial. O BAC-AMR 3D apresentou menor intensidade e perfis característicos para as passagens em x e em y. Na figura 2-B a resposta do sistema em relação a passagem no eixo x está de acordo com o esperado, representando simetria em seus dois lados de contribuição, não comprometendo a obtenção da resultante no eixo x. Na figura 3-B observa-se a passagem

do comprimido magnético no eixo y com um perfil similar a passagem no eixo x, mas com as contribuições inversas e com um perfil não tão simétrico representado por uma pequena intensidade de sinal no eixo x, o que pode estar associado à um possível erro de posicionamento ou pela diferença de posição das tiras magnetoresistivas. Este problema já foi abordado, e possivelmente a diferença das tiras magnetorresistivas influenciam de forma mais sólida do que o posicionamento inadequado, o que requer uma futura investigação. O diâmetro do comprimido magnético também pode ser o influenciador (Paixão, 2009). Foi identificado maior intensidade ao utilizar o sistema BAC-monocanal e obteve-se mais informações espaciais ao utilizar-se o sistema BAC-AMR 3D, permitindo analisar duas resultantes, referentes aos eixos x e y com diferentes intensidades de contribuições de cada componente. Neste caso as resultantes expressam uma gaussiana com diferentes intensidades, porém por representar uma passagem completa nos eixos x e y, espera-se um perfil simétrico em x e y.

4.3 Teste de sensibilidade axial eixo z

A figura 4 mostra os resultados referentes ao teste de sensibilidade axial. A figura 4-A representa a resposta do sensor BAC-monocanal em relação ao teste axial e a figura 4-B representa a resposta do sensor BAC-AMR 3D para a aproximação do material magnético no eixo z.

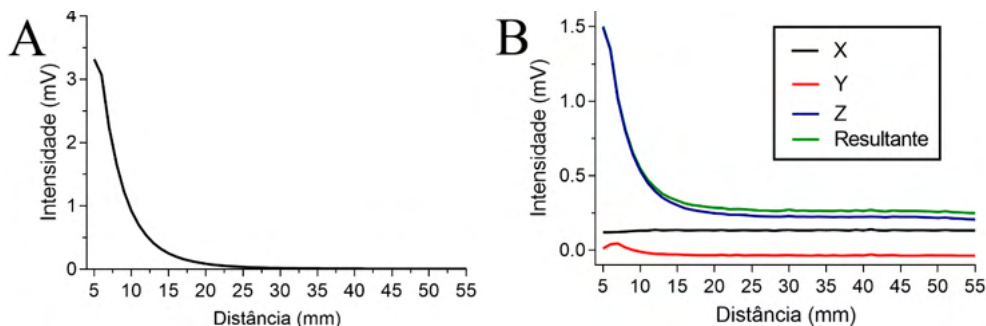


Figura 4. (A) Sensibilidade axial BAC-monocanal (B) Sensibilidade axial BAC-AMR 3D.

A partir da análise gráfica, observa-se o mesmo perfil de resposta, representado por um decaimento exponencial de acordo com a distância do material magnético em relação ao centro dos sensores. A intensidade de sinal no ponto mais próximo dos sensores foi mais alta para o sistema BAC-monocanal, demonstrando maior sensibilidade axial. Na figura 5 foi plotado somente o eixo z do BAC-AMR 3D em comparação com o BAC-monocanal em escala logarítmica.

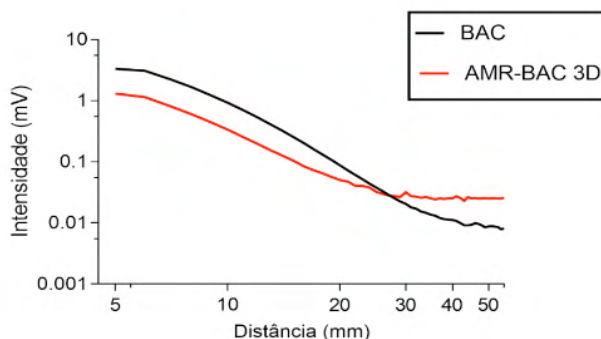


Figura 5. Sensibilidade axial em decaimento logarítmico para BAC-monocanal e BAC-AMR 3D.

A escala logarítmica permite a comparação gráfica dos perfis de decaimento, na qual a intercessão dos eixos é explicada devido ao *offset* do sensor BAC-AMR 3D ser mais alto do que a do sensor BAC-monocanal, que é bem mais próximo do valor zero. Em relação ao BAC-AMR 3D, apesar de possuir menor sensibilidade não demonstrou contribuições significativas dos eixos x e y, evidenciando uma resultante muito parecida com o sinal obtido de forma axial, utilizando apenas o eixo de detecção z.

4.4 Varredura de frequências

Foi realizado um teste axial para ambos os sistemas com o intuito de analisar a resposta de cada sensor frente a variação de frequências de excitação. A figura 6 demonstra os resultados obtidos, na qual 6-A é referente à BAC-monocanal e 6-B ao sistema BAC-AMR 3D.

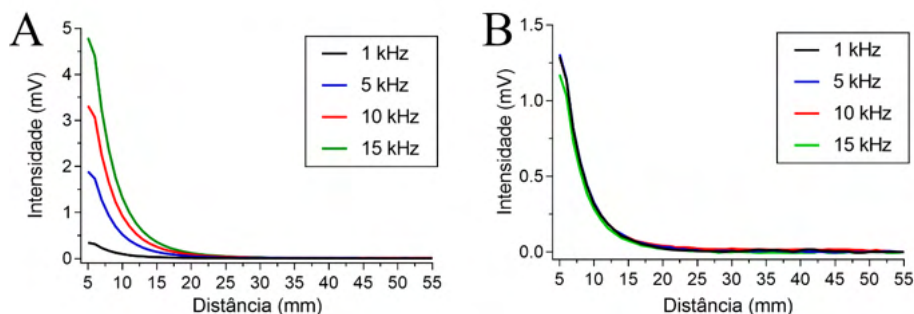


Figura 6. Teste axial sujeito a variação de frequências. (A) BAC-monocanal. (B) BAC-AMR 3D.

Os resultados enaltecem a dependência de frequência do sistema BAC-monocanal. A intensidade de sinal decai de acordo com a diminuição da frequência. O sistema BAC-AMR 3D não apresenta dependência de frequência no range variado, mantendo a mesma intensidade de sinal. A dependência em relação à frequência pode ser explicada pelo fato

de o sistema BAC partir do princípio de indução da Lei de Faraday.

Temos que:

$$\varepsilon = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (1)$$

Sendo: ε : força eletromotriz induzida, $d\Phi$: variação do fluxo magnético, dt intervalo de tempo. Assim, o sinal de saída pode ser dado por:

$$Vd = (M_{12} - M_{34}) \frac{dI_e}{dt} + RI \quad (2)$$

Os detectores AMRs funcionam através da diferença direta de resistividade no filme de acordo com a direção do campo aplicado, dada por:

$$R = R_0 + \Delta R \cos^2 \theta \quad (3)$$

Onde R é a resistência oferecida pela tira, R_0 é a resistência elétrica mínima, ΔR é a variação $R - R_0$ e $\cos^2 \theta$ é referente a dependência da direção do campo aplicado.

4.5 Simulação de contração *in vitro*

Os gráficos referentes a figura 7-A e 7-B representam os sinais no domínio do temporal e os gráficos 7-C e 7-D, representam os sinais no domínio de frequências, após a aplicação da Transformada de Fourier.

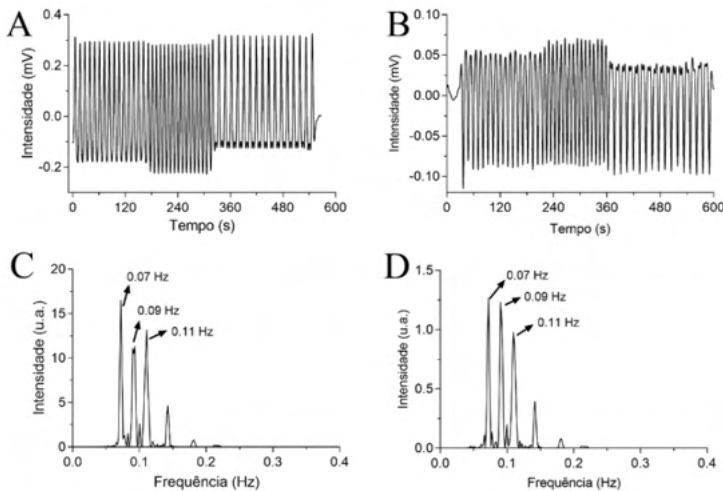


Figura 7. Simulação de contração *in vitro*. **(A)** Sinal no domínio temporal para BAC. **(B)** Sinal no domínio temporal para o BAC-AMR 3D. **(C)** Resultado da FFT para BAC. **(D)** Resultado da FFT para o BAC-AMR 3D.

Para o BAC-AMR 3D apenas o eixo axial z foi considerado. Observa-se o mesmo

padrão de frequências identificadas para ambas as técnicas, porém com intensidades de sinais diferentes. Como já observado na discussão do teste axial, o sistema BAC-monocanal apresenta maior intensidade, o que no caso de teste *in vivo* seria importante, levando em consideração o decaimento do sinal pela distância do material magnético até o centro do sensor, dada pela espessura do tecido.

Apesar da diferença em relação as intensidades, ambas foram capazes de diferenciar as frequências, podendo ser facilmente visualizadas através dos picos de Fourier dos gráficos no domínio de frequência, na qual ambas identificaram picos em frequências idênticas e seus harmônicos associados.

4.6 Escaneamento – BAC-AMR 3D e BAC-monocanal

As letras A, B, C e D representam cada componente de detecção do sensor, dados respectivamente por x, y, z e a resultante, que é proveniente de diferentes contribuições de cada componente.

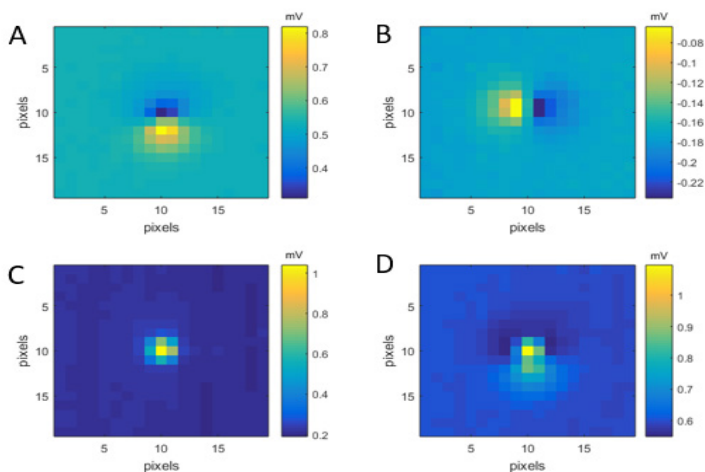


Figura 8. Imagens magnéticas 2D BAC-AMR 3D. (A) Eixo x (B) Eixo y (C) Eixo z (D) Resultante.

Os resultados obtidos para o BAC-AMR 3D mostram a capacidade de medir campo magnético nos três eixos de detecção, apresentando certa simetria ortogonal nos eixos x e y. A maior intensidade do sinal no eixo axial, z, é explicada devido ao alinhamento do eixo z com a excitação magnética, o eixo z encontra-se posicionado no centro da bobina excitadora. Através deste mapeamento de campo magnético verifica-se que o BAC-AMR 3D é capaz de localizar o comprimido magnético espacialmente, neste caso, posicionado no centro da matriz. A partir da distribuição dos máximos e mínimos observados nos eixos x e y é possível criar quadrantes bem definidos (Paixão, 2009). Quadrantes determinados pela

simetria ortogonal dos sinais de campo detectados nos eixos x e y são representados na figura 9A. A figura 9B representa o resultado obtido através do mapeamento do comprimido magnético sobre o sistema BAC-monocanal.

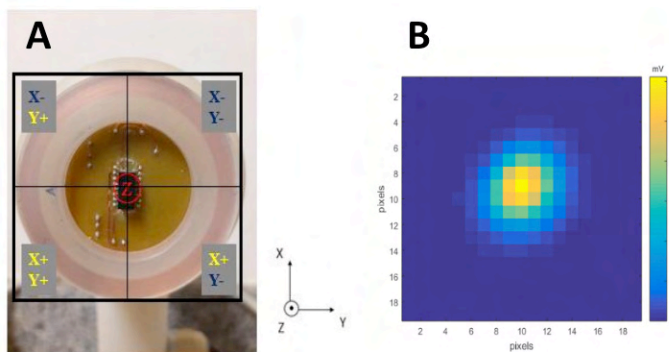


Figura 9. (A) Quadrantes determinados pela simetria ortogonal dos sinais detectados nos eixos x e y. (B) Imagem Magnética 2D – Sensor BAC-monocanal.

Os resultados referentes ao sistema BAC-monocanal nos fornece apenas uma coordenada axial, que apesar de maior intensidade, não é capaz de fornecer informações sobre a posição do material magnético na matriz e nem criar quadrantes de localização bem definidos. Apesar da alta sensibilidade do sensor BAC-monocanal, o BAC-AMR 3D possui melhor capacidade de localização do material magnético em uma matriz. A técnica BAC-AMR 3D será muito importante para novas abordagens. Modelagens em linguagem de programação *Python* vem sendo aplicadas pelo grupo de biomagnetismo, como proposta para realização de imagens quantitativas. A aplicabilidade de cada uma das técnicas pode ser analisada através do objetivo a ser empregado.

51 CONCLUSÃO

As duas técnicas se apresentam como boas opções na detecção de materiais magnéticos e obtenção de imagens magnéticas. A utilização de cada um dos dois sistemas pode ser escolhido de acordo com a finalidade e metodologia desejada, com base nos resultados obtidos, na qual, o sensor BAC se comportou de forma mais sensível na detecção de materiais magnéticos pontuais no eixo axial, ideal para detecção de marcadores magnéticos fixos, ou cuja localização seja previamente conhecida, na qual, a distância entre o marcador magnético e o centro do sensor seja maior. Já o BAC-AMR 3D pela capacidade de fornecer mais duas componentes de detecção, torna o sistema ideal para medidas que exigem determinação da posição de um certo marcador magnético com o intuito de se obter informações espaciais, apesar da menor sensibilidade em relação ao

sensor BAC. Perspectivas futuras já são traçadas com o objetivo de resolver o problema inverso para o sistema BAC-AMR 3D e obter imagens quantitativas de maior qualidade, visto que, com mais duas componentes de detecção, maior sustentabilidade é oferecida para tal resolução. Experimentos sem excitação serão explorados para o BAC-AMR 3D, visando estabelecer cada vez mais novas aplicabilidades ao sistema.

REFERÊNCIAS

AGOSTINHO, M. R. Desenvolvimento, otimização e caracterização física de um novo sistema multi-sensores de Biosusceptometria de Corrente Alternada (BAC) para obtenção de imagens biomagnéticas. 2008.

AMERICO, M. F. et al. Validation of ACB in vitro and in vivo as a biomagnetic method for measuring stomach contraction. **Neurogastroenterology & Motility**, v. 22, n. 12, p. 1340-e374, 2010. ISSN 1350-1925.

BAFFA, O. et al. Analysis and development of AC biosusceptometer for oro-caecal transit time measurements. **Medical and Biological Engineering and Computing**, v. 33, n. 3, p. 353-357, 1995. ISSN 0140-0118.

CORÁ, L. A. et al. Disintegration of magnetic tablets in human stomach evaluated by alternate current Biosusceptometry. **European journal of pharmaceutics and biopharmaceutics**, v. 56, n. 3, p. 413-420, 2003. ISSN 0939-6411.

FAGALY, R. Superconducting quantum interference device instruments and applications. **Review of scientific instruments**, v. 77, n. 10, p. 101101, 2006. ISSN 0034-6748.

LENZ, J. et al. A high-sensitivity magnetoresistive sensor. IEEE 4th Technical Digest on Solid-State Sensor and Actuator Workshop, 1990, IEEE. p.114-117.

MORAES, R. et al. Measurement of gastric contraction activity in dogs by means of AC biosusceptometry. **Physiological measurement**, v. 24, n. 2, p. 337, 2003. ISSN 0967-3334.

PAIXÃO, F. C. Utilização de magnetorresistores no desenvolvimento de novas técnicas para aplicações em gastroenterologia. 2009.

PAIXAO, F. C. et al. Development of an AMR-ACB array for gastrointestinal motility studies. **IEEE transactions on biomedical engineering**, v. 59, n. 10, p. 2737-2743, 2012. ISSN 0018-9294.

PAIXAO, F. C. et al. A novel device with 36 channels for imaging and signal acquisition of the gastrointestinal tract based on AC biosusceptometry. 2010 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology, 2010, IEEE. p.6457-6460.

PRÓSPERO, A. G. Aplicação do sistema de biosusceptometria AC para monitoramento de nanopartículas magnéticas na circulação sanguínea. 2015.

PRÓSPERO, A. G. et al. Aplicação de Métodos Matemáticos para Análise de Resolução Espacial em Sensores BAC. **Revista Brasileira de Física Médica**, v. 13, n. 2, p. 43-46, 2019. ISSN 1984-9001.

SARITAS, E. U. et al. Magnetic particle imaging (MPI) for NMR and MRI researchers. **Journal of Magnetic Resonance**, v. 229, p. 116-126, 2013. ISSN 1090-7807.

SOARES, G. A. Biosusceptometria AC multicanal para avaliação in vivo de perfis farmacocinéticos de nanopartículas magnéticas por imagens. 2018.

CHEMICAL INFLUENCES AND CHALLENGES ASSOCIATED WITH ENHANCED Nb₃Sn SUPERCONDUCTOR DEVELOPMENT

Data de aceite: 01/09/2022

Erick Agnolin

Instituto de Química, Universidade de Passo Fundo
Fundo
Passo Fundo – RS, Brazil

Ana P. H. Vaniel

Instituto de Química, Universidade de Passo Fundo
Fundo
Passo Fundo – RS, Brazil

ABSTRACT: Nb₃Sn_(s) composites are the go-to superconductors for high magnetic field applications, however, the material is associated with immense difficulty around its manufacturing processes. Different approaches have been taken over the years in order to overcome engineering difficulties regarding superconducting wire production, with two methods being able to successfully provide strands with satisfactory properties, the so-called “Powder-In-Tube” and “Internal-Tin” processes, which utilize optimized heat treatments and stoichiometric composition, since chemical influences can shift the balance between superconducting properties such as critical current density (J_c), critical temperature (T_c) and upper critical field limit (H_{c2}), all of which act as functions of atomic Tin content (at.% Sn(s)). Since Nb₃Sn(s) displays type II superconductor behavior, efforts that lead to increases in J_c values are essential, distinctively by artificial pinning centers (APCs) addition by means of ternary insertions in order to promote greater density of flux pinning centers as deduced from

current scientific consensus, however, further research is necessary to determine specific mechanics around pinning centers and grain boundary sizes.

KEYWORDS: Nb₃Sn(s), stoichiometry, superconducting properties, artificial pinning centers.

INTRODUCTION

Although the last decades have witnessed the almost homogeneous domination of NbTi_(s) superconducting alloys for industrial uses due to better ductility, it was always known that at a certain point in time there would be a need for a material with better superconducting properties, such as a higher upper magnetic critical field limit (H_{c2}) and capacity to withstand bigger electrical currents.

The intermetallic Niobium-Tin alloy, or Nb₃Sn_(s), is a Nb_(s) based superconductor with an A15 phase in a body-centered cubic lattice, or *bcc* lattice, of Sn_(s) atoms with three orthogonal chains of Nb_(s) atoms in parallel to the edges of the unit cell that bisect the *bcc* cube faces.¹ It has a critical temperature (T_c) of around 9.2 – 18.3 K (18 – 25 at.% Sn_(s)), and has regained interest from the scientific community during the past years over the consensus concerning the inevitable exhaustion of the NbTi(s) alloy’s intrinsic limits of performance.²

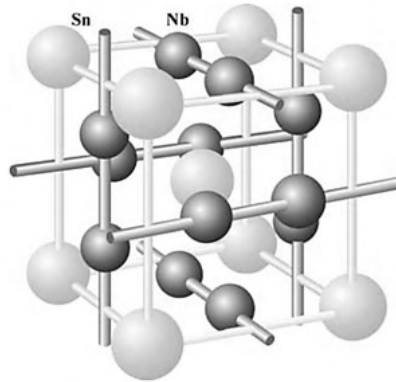


Figure 1. Illustration of the $\text{Nb}_3\text{Sn}_{(s)}$ A15 unit cell, with the $\text{Sn}_{(s)}$ atoms forming a bcc lattice and the orthogonal $\text{Nb}_{(s)}$ atomic chains on the bcc faces (adapted from reference 8).

The first registered observations of superconductive behavior in $\text{Nb}_3\text{Sn}_{(s)}$ were reported by Matthias *et al.* in 1954,³ only one year after the discovery of the first registered A15 phase superconductor, $\text{V}_3\text{Si}_{(s)}$, by Hardy and Hum, in 1953.⁴ The highest reported T_c for $\text{Nb}_3\text{Sn}_{(s)}$ was 18.3 K by Hanak *et al.* in 1964,² but ever since its discovery, Niobium-Tin alloys have amassed great interest due to the capability to carry very large current densities, at least when compared against the industrially used $\text{NbTi}_{(s)}$ alloys, however, the production of $\text{Nb-Sn}_{(s)}$ wires is considerably challenging as consequence of the brittleness of the material, meaning that high strain may thoroughly compromise superconductivity on the sample, and the requirement for high-temperature processing in order to achieve the desired superconducting A15 $\text{Nb}_3\text{Sn}_{(s)}$ phase.

Although a great extent of current day superconductive material is $\text{NbTi}_{(s)}$ -based, applications that require high-field electromagnets employ $\text{Nb}_3\text{Sn}_{(s)}$ in their composition (*e.g.*, particle accelerators,²⁷ tokamak devices and solenoid coils, magnetic resonance imaging [MRI], nuclear magnetic resonance [NMR], as well as non-magnetic applications such as superconducting radio frequency (SRF) cavities⁵), and further enhancement in intrinsic properties such as J_c , better T_c and H_{c2} values are needed for future specific applications, such as the ITER project^{6,7}], which keeps $\text{Nb}_3\text{Sn}_{(s)}$ research an extremely relevant and vital topic for future applications.

Different stoichiometric adjustments regarding the atomic $\text{Sn}_{(s)}$ content (β) result in changes for both T_c and H_{c2} , which resulted in extensive research on the correlation between the at.% $\text{Sn}_{(s)}$ content and alterations caused in the values for both critical temperature and upper critical field limit,⁸ and it is reported that both variables act as functions of stoichiometry, furthermore, since these the critical current density (J_c) is largely dependent of the H_{c2} value, it is also heavily dependent of stoichiometry.⁹

REVIEW ON THE CURRENT STATE OF $\text{Nb}_3\text{Sn}_{(s)}$ SUPERCONDUCTORS

Despite the fact that $\text{Nb}_3\text{Sn}_{(s)}$ superconductors display better intrinsic properties when compared to $\text{Nb-Ti}_{(s)}$ alloys, the latter was responsible for overwhelmingly larger practical applications mainly because of the better (and easier to work with) physical properties, resulting in a much easier manufacturing process for electromagnetic wires and coils.

In the present day, two methods of manufacturing are still currently being used in the industry for the creation of $\text{Nb}_3\text{Sn}_{(s)}$ wires with satisfactory J_c values (for high energy physics uses as well as for sectors with the need for high-fields), they are so called the “Powder-In-Tube” (PIT) and “Internal-Tin” (IT)²² methods.

Although great progress was reached during the last couple of decades on the matter of $\text{Nb}_3\text{Sn}_{(s)}$ wires assembly, there is still need for research on the development of wires for high-field applications, such as the Future Circular Collider (FCC)^{22,23,27}, with specifications for the requirements of higher J_c , as well as the relentless need for a reduction of the manufacturing process cost.

POWDER-IN-TUBE PROCESS

Recent PIT processes consist on the usage of thick Niobium tubes filled with $\text{NbSn}_{2(s)}$ powder in a Copper matrix, and the final wire is then extruded from the initial composite.^{21,26}

The superconducting wires achieved via PIT process display both good filament sizes, $\leq 50 \mu\text{m}$, and high J_c values, however, its production cost is considerably higher than the alternative (IT) method. An illustration of the final PIT composite wire is shown in Figure 2.

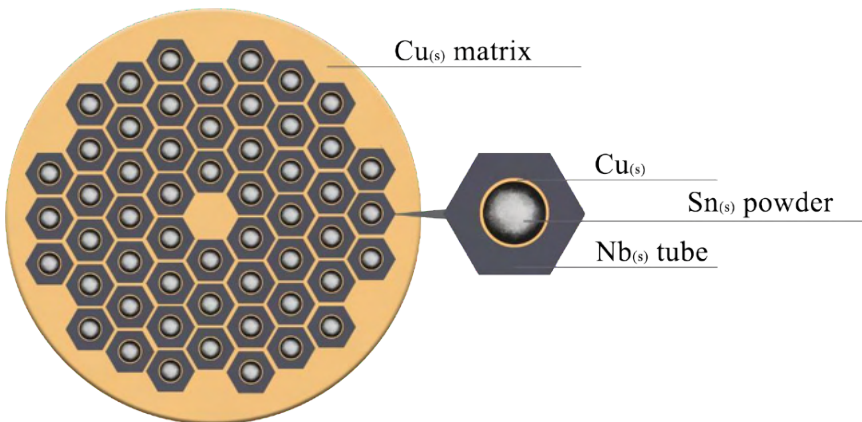


Figure 2. Illustration of a PIT wire, with an $\text{Sn}_{(s)}$ -rich powder in the $\text{Nb}_{(s)}$ tube. The $\text{Cu}_{(s)}$ boundary, or barrier, may be adapted according to alternative manufacturing methods.

The A15 $\text{Nb}_3\text{Sn}_{(s)}$ phase is reached via a solid-state diffusion reaction after several

days at a temperature around 675 °C, in which the $\text{NbSn}_{2(s)}$ powder in the $\text{Cu}_{(s)}$ matrix is initially converted into $\text{Nb}_6\text{Sn}_{5(s)}$ and only then into $\text{Nb}_3\text{Sn}_{(s)}$, with the reaction ceasing after roughly 64 h at ~675 °C as result of $[\text{Sn}_{(s)}]$ exhaustion.^{8,22}

INTERNAL-TIN PROCESS (ROD RESTACK PROCESS)

Although IT (RRP) processes may differ widely from each other, the main concept is based upon the assembly of large quantities of $\text{Nb}_{(s)}$ filaments and refined $\text{Sn}_{(s)}$ (or alloys) rods in a pure $\text{Cu}_{(s)}$ matrix enclosed by a boundary, or barrier, made of Niobium in order to prevent Tin diffusion into the matrix, in which the wire is then cold-drawn into the final shape.²⁶

An illustration of the final IT composite wire is shown in Figure 3.

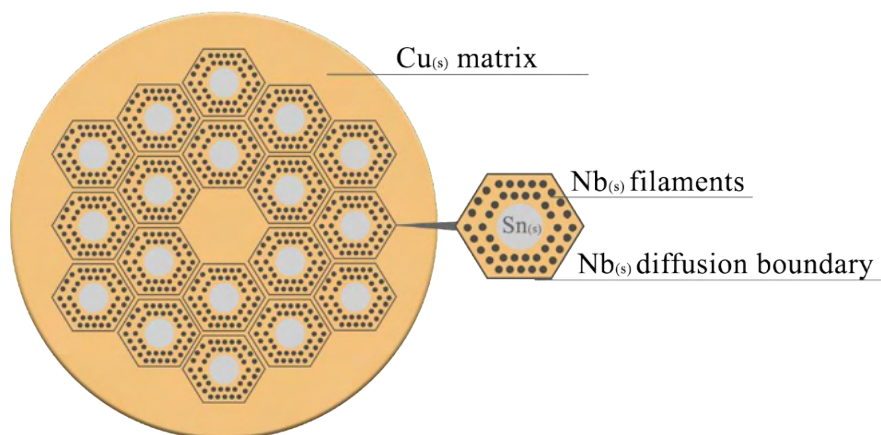


Figure 3. Illustration of an IT (RRP) wire with distributed $\text{Nb}_{(s)}$ boundaries, or barriers. An alternative configuration includes a single $\text{Nb}_{(s)}$ (or $\text{Nb}_{(s)}$ alloy) boundary surrounding the total filament structure perimeter.

Throughout the process, during the heat treatment step, there is a surge of $\text{Cu-Sn}_{(sll)}$ phases which are created and annihilated during the solid-state diffusion process and the $\text{Nb}_3\text{Sn}_{(s)}$ formation, which results in potential hindrance or damage to the wire. The unwanted $\text{Cu-Sn}_{(sll)}$ phases issue is solved by applying the heat treatment in different intensities, firstly at just below 227 °C to create a layer of $\text{Cu-Sn}_{(s)}$ with a higher fusion temperature, which works as a container for the fused $\text{Sn}_{(l)}$ at >227 °C, followed by a steady application of ~210 °C (24-72 h) and ~400 °C (24-48 h) with the intention of providing enough Tin diffusion into each filament (and to avoid leakage into the $\text{Cu}_{(s)}$ matrix). The $\text{A15 Nb}_3\text{Sn}_{(s)}$ phase is obtained during the third and final step of the heat treatment which varies between ~620 °C and ~750 °C, also responsible for the formation of the current optimal material microstructure. It is possible to apply higher temperatures for the reduction of the

time required for the process completion, however, higher temperatures usually yield greater grain sizes, which influences the desired superconducting properties of the material as well as possible Sn_(s) contamination in the matrix which then results in increased electrical and thermal resistivity.^{22,26}

STOICHIOMETRY INFLUENCES ON THE ELECTRON-PHONON INTERACTION

Nb₃Sn_(s) can be generally described as a strong coupling superconductor, therefore, the approximation provided by the Bardeen-Cooper-Schrieffer (BCS)¹⁰ theory for the weak coupling energy gap at zero temperature (Δ_0) cannot be valid for Niobium- Tin superconductors.^{8,10}

$$\Delta_0 = 2\hbar\omega_c e^{-\frac{1}{\lambda_{ep}}} \quad (1)$$

$$T_c(0) \cong \frac{2e\gamma E}{\pi k_B} \hbar\omega_c e^{-\frac{1}{\lambda_{ep}}} \quad (1.1)$$

This equation (1) is valid for values that match $\lambda_{ep} \ll 1$ at Δ_0 . With λ_{ep} being a parameter without dimensions for the electron-phonon interaction⁸ and $\hbar\omega_c$ as a parameter of energy from the Fermi level (E_F), and outside of which the interactive potential for the electron coupling is equal to zero.^{11,18}

With the restriction that the temperature dependency of $\Delta(T) = 0$ at $T \rightarrow T_c$, equation (1) becomes equation (1.1), with γE being the Euler's constant with a value of $\cong 0.577$, and k_B being the Boltzmann constant.

The ratio between (1) and (1.1) gives the limit for the BCS theory's weak coupling limit:

$$\frac{2\Delta_0}{k_B T_c} = 3.528 \quad (2)$$

Regarding weak coupling for Niobium-Tin, (1) and (1.1) are no longer valid since they become sensitive to details of the electron-phonon interaction, henceforth, the ratio yields a higher result above the limit for weak coupling interaction ($\lambda_{ep} \ll 1$) at zero temperature described by $2\Delta_0/k_B T_c$.^{8,10,11}

To analyze the superconducting gap and T_c in Niobium-Tin films as a function of Sn(s) content, as well as for the ratio between $2\Delta_0/k_B T_c$, Moore *et al.*¹² performed tunneling experiments with the use of a Boltzmann function with a corresponding sigmoidal distribution:

$$y(\beta) = \frac{y_{\min} - y_{\max}}{1 - e^{\left(\frac{\beta - \beta_0}{\Delta\beta}\right)}} + y_{\max} \quad (3)$$

Where $y = T_c$ or Δ , and $\beta = \text{at.}\% \text{ Sn}_{(s)}$. Results expressed weak coupling for ~ 20 - 24 at.% Sn(s) and strong coupling for ≥ 24 at.% Sn_(s), with T_c and $\Delta(\beta)$ precisely expressed by (3). Results for $\beta \leq \sim 24$ at.% Sn_(s) mean that the electron coupling relation is weakened due to decrease in phonon frequency as a result of softening in the lattice. ^{8,12,19}

STOICHIOMETRY INFLUENCES ON THE CRITICAL TEMPERATURE AND UPPER CRITICAL FIELD LIMIT

Due to gradients related to composition, T_c and H_{c2} values can fluctuate as a function of atomic Tin content. A few datasets of A15 composition ranges are available in the literature, with the most comprehensive analysis being from Devantey *et al.*¹³ which contains values that are expected for the A15 phase.

$$T_c(\beta) = \frac{-12.3}{1 + e^{\left(\frac{\beta - 0.22}{0.009}\right)}} + 18.3 \quad (4)$$

Utilizing a Boltzmann sigmoidal function similar to (3), with the maximum reported value for Niobium-Tin's T_c of 18.3 K,² it was found a correlation for the data provided by Devantey for increasement in T_c as function of atomic Tin content, with the minimum correlation value displayed at ~ 0.22 K for ~ 18 at.% Sn_(s) and the maximum of 18.3 K for ~ 24 -25 at.% Sn_(s).

$$\mu_0 H_{c2}(\beta) = -10^{-30} e^{\left(\frac{\beta}{0.00348}\right)} + 577\beta - 107 \quad (5)$$

Equation (5) represents the function utilized in a display of collected data for H_{c2} variations which demonstrated a linear trend with the $\mu_0 H_{c2}(\beta)$ function, with the maximum H_{c2} value at ~ 31 T for ~ 24.5 at.% Sn_(s). Equations (3), (4) and (5) demonstrate the variations for values associated with T_c and H_{c2} , as a function of stoichiometry, more specifically, the atomic content of Tin in the samples, therefore, prospects for improvements in these parameters may appear to lie in better stoichiometry adjustments, however, small changes in concentrations may result in unwanted changes in other parameters, with possible decreases in the respective superconductivity properties. ^{8,13,14,15}

GRAIN BOUNDARIES, PINNING CAPACITY AND J_c

The (Cu_(s)) matrix is not taken into account when quantization for the critical current density is described by the total (Nb₃Sn_(s)) filament area. The layer J_c is given by the Nb₃Sn_(s) area responsible for the current carriage.²¹

Considering that A15 Nb-Sn_(s) shows behavior analogue to type II superconductors (partial penetration of field lines between H_{c1} and H_{c2} at T_c), the main contributing factor for the A15 Nb-Sn_(s) capacity to carry current relies on the bulk pinning force (FP), which can be determined by its balance with the Lorentz force: $FP = J_c \times \mathbf{B}$, where \mathbf{B} (in a dipole cos

θ magnet) is the magnetic field generated by the coil: $\mathbf{B} = \mu_0 W \cdot J_{\text{coil}}$. The electronic current density in the coil (J_{coil}) is determined in the material based on its J_c , and W is the coil width. The maximum bulk pinning force, $F_{P, \text{max}}$, is associated with the density of flux pinning centers, which are deduced to be primarily related to grain boundaries in the material.^{9,19}

With the assumption that the physical properties are standardized, J_c in $\text{Nb}_3\text{Sn}_{(s)}$ can be mainly described by the current-carrying fractions, H_{c2} and $F_{P, \text{max}}$, or, in case of property gradient, the maximum J_c of a $\text{Nb}_3\text{Sn}_{(s)}$ wire is determined by the limits of the weakest part in the composition.⁹ These parameters ($\text{Nb}_3\text{Sn}_{(s)}$ fractions, H_{c2} and $F_{P, \text{max}}$) are all dependent of the internal structure and chemistry of the materials, with the behavior for H_{c2} being largely dependent on stoichiometry and composition while $F_{P, \text{max}}$ is greatly related to the flux pinning centers quantized by volume which are, consecutively, dependent of the grain boundary sizes and flux pinning centers in $\text{Nb}_3\text{Sn}_{(s)}$.

Although specific mechanisms describing the maximum bulk pinning strength in the grain boundaries are not fully comprehended, the maximum bulk pinning force ($F_{P, \text{max}}$) in addition with temperature phase boundaries and strain effects can determine optimal J_c values for $\text{Nb}_3\text{Sn}_{(s)}$ composite wires.^{8,9,17}

ARTIFICIAL PINNING CENTERS

Improvements of current density values for superconducting $\text{Nb}_3\text{Sn}_{(s)}$ composite wires seem to rely on the increasement of bulk pinning force through addition of artificial pinning centers (APCs) in these materials. Improved values for J_c in $\text{Nb}_3\text{Sn}_{(s)}$ composite wires are obtained by the introduction of APCs based on different ternary materials (*e.g.*, $\text{Cu}_{(s)}$) in nanometric scale with matching spacing between flux line lattice.^{20,22}

The introduction of different materials for performance enhancing values of J_c is not exclusive to $\text{Nb}_3\text{Sn}_{(s)}$ superconductors. Da Silva et al.¹⁶ performed measurements with different material additions as artificial pinning centers for $\text{MgB}_{2(s)}$ superconductors, such as $\text{VB}_{2(s)}$, $\text{SiC}_{(s)}$ and carbon doping and reported improvements for the critical current density value in high-field, with more intense flux lines penetration, with the best superconducting performance being attributed to a $\text{MgB}_{2(s)}$ sample accompanied by a concurrent addition of 10 wt.% $\text{SiC}_{(s)}$ and 2 at.% $\text{VB}_{2(s)}$. However, such additions that improve J_c values most likely also result in an unwanted reduction, or alteration, of other superconducting properties (*e.g.*, T_c and H_{c2}) as a result of proximity effects with non- superconducting materials.^{16,23,24,25}

CONCLUSIONS AND PERSPECTIVES

With regards to the $\text{Nb-Sn}_{(s)}$ A15 phase, T_c , H_{c2} and J_c , as well as electron-phonon interaction, each can be described as at.% $\text{Sn}_{(s)}$ dependent. Cooper pair coupling for microscopic activity in the $\text{Nb}_3\text{Sn}_{(s)}$ lattice can no longer be defined by the BCS theory weak coupling characterization for atomic Tin content above 23%, which translates to the

requirement of certain corrections apropos of strong coupling display.

The superconducting property values for T_c and H_{c2} , much like the electron-phonon interaction, behave as function of atomic Tin content in the sample, with several datasets available in the literature displaying closely related observed results regarding $[\text{Sn}_{(s)}]$ gradient in $\text{Nb}_3\text{Sn}_{(s)}$ composition.

Despite the significant accomplishments during the last years with respects to $\text{Nb}_3\text{Sn}_{(s)}$ superconductor production, notably the development of the Powder-In-Tube and Internal Tin processes, however, since heat treatments and stoichiometry adjustments are nearly achieving maximum practical potential, prospects for further improvements in J_c therefore rely on better comprehension and engineering around artificial pinning centers and reduced grain sizes through addition of artificial pinning centers based on ternary insertions in the composite with the purpose of increasing the density of flux pinning centers.

REFERENCES

1. Godeke, A.; *Supercond. Sci. Technol.* **2006**, *1*, 2, 12.
2. Hanak J.; Strater, K.; Cullen, R.; *RCA Review.* **1964**, *25*, 342.
3. Matthias, B.; Geballe, T.; Geller, S.; Corenzwit, E.; *Phys. Rev.* **1954**, *95*, 1435.
4. Hardy, G.; Hulm, J.; *Phys. Rev.* **1953**, *89*, 884.
5. Lee, J.; Mao, Z.; He, K.; Sung, Z. H.; Spina, T.; Baik, S.; Hall, D. L.; Liepe, M.; Seidman, D. N.; Posen, S.; *Acta Mater.* **2020**, *188*, 155, 165.
6. Everitt, D.; Reiersen, W.; Martovetsky, N.; Hussung, R.; Litherland, S.; Freudenberg, K.; Myatt, L.; Hatfield, D.; Cole, M.; Irick, D. K.; Reed, R.; Lyraud, C.; Libeyre, P.; Bessette, D.; Jong, C.; Mitchell, N.; Rodriguez-Mateos, F.; Dolgetta, N.; *IEEE 25th Symp. Fusion Eng.* **2013**, *25*, 1, 8.
7. Foussat, A.; Mitchell, N.; Gallix, R.; Gandel, M.; Hamada, K.; Koczorowski, S.; Seo, K.; Boyer, C.; Le Rest, M.; Martin, B.; Jong, C.; Devred, A.; Journeaux, J. Y.; Alekseev, A.; Gung, C.; Petit, P.; Reich, J.; Oliva, A. B.; Bellesia, A.; Boter Rebollo, E.; Harrison, R.; Koizumi, N.; Hemmi, T.; Matsui, K.; Nakahira, M.; *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **2016**, *26*, 1, 5.
8. GODEKE, A.: *Performance Boundaries in Nb3sn Superconductors*, PhD thesis, University of Twente, Enschede, The Netherlands, 2005.
9. Xu, X.: *Supercond. Sci. Technol.* **2017**, *30*, 093001
10. Bardeen, J.; Cooper, L.; Schrieffer, J.; *Phys. Rev.* **1957**, *108*, 1175.
11. Landau, L. D.; Ginzburg, V. L.; *Zhur. Éksp. Teoret. Fiz.* **1950**, *20*, 1064
12. Moore, D.; Zubeck, R.; J. Rowell, J.; Beasley, M.; *Phys. Rev. B.* **1979**, *20*, 2721.

13. Devantay, H.; Jorda, J.; Decroux, M.; Muller, J.; Flükiger, R.; *J. Mater. Sci.* **1981**, *16*, 2145.
14. Flükiger, R.; *Kernforschungszentrum Karl-sruhe*, **1987**.
15. Flükiger, R.; Isernhagen, R.; Goldacker, W.; Specking, W.; *Adv. Cryo. Eng.* **1984**, *30*, 851.
16. Silva, L. B. S.; Serquis, A.; Hellstrom, E. E.; Rodrigues, D.; *Supercond. Sci. Technol.* **2020**, *33* 045013.
17. Zhou, R.; Hong, S.; Marken, K. R.; Kear, B. H.; *Adv. Cryo. Eng. Mat.* **1994**, *1*, 939, 943.
18. Gala, F.; de Marzi, G.; Muzzi, L.; Zollo, G.; *Phys. Chem. Chem. Phys.* **2016**, *18*, 48, 32840, 32846.
19. Haugan, T. J., Puig, T., Matsumoto, K.; Wu, J.; *Supercond. Sci. Technol.* **2020**, *4*.
20. Girvin, S. M.; Yang, K.; *Modern Condensed Matter Physics*. Physics, 1st ed.; Padstow, Cornwall, UK, 2019.
21. XU, X.: *Prospects to Improve the Critical Current Density of Superconducting Nb3Sn strands*. PhD thesis, The Ohio State University, Columbus, Ohio, United States of America, 2016.
22. VILLEGAS, H., A.: *Resistivity and Thermal Conductivity Measurements on Heavy-Fermion Superconductors in Rotating Magnetic Fields*; PhD thesis, Max- Planck-Institut Fur Chemische Physik Fester Stoffe, Dresden, Saxony, Germany. 2012.
23. EBERMANN, P.: *Relevance of the irreversible degradation of superconducting Nb3Sn wires and cables caused by transverse stress at room temperature within the FCC study at CERN*, PhD thesis, Vienna University of Technology, Vienna, Austria, 2019.
24. SANABRIA, C.: *A new understanding of the heat treatment of Nb-Sn superconducting wires*, PhD thesis, Florida State University, Tallahassee, Florida, United States of America, 2017.
25. MONROE, J. T.; *Partial Measurements of Quantum Systems*, PhD thesis, Washington University in St. Louis, St. Louis, Missouri, United States of America, 2021.
26. Barzi, E.; Zlobin, A.V.; Schoerling, D.; *Nb3Sn Accelerator Magnets: Particle Acceleration and Detection*. 1st ed.; Springer, Cham., 2019.
27. Apollinari, G.; Béjar Alonso, I.; Brüning, O.; Lamont, M.; Rossi, L.; *CERN*, **2015**, *1*, 285.

AVALIAÇÃO DAS COMPONENTES DA RADIAÇÃO SOLAR E DO ÍNDICE DE CLARIDADE PARA CAICÓ/RN

Data de aceite: 01/09/2022

José Augusto Ferreira Neto

<http://lattes.cnpq.br/0401494432064481>

Thiago Gonçalves da Silva

<http://lattes.cnpq.br/9247213148151165>

Everton Felipe de Souza Pinheiro

<http://lattes.cnpq.br/3226955524305254>

Paula Andressa Alves de Araújo

<http://lattes.cnpq.br/4857107569349842>

RESUMO: O presente trabalho buscou realizar uma avaliação dos comportamentos das componentes da radiação solar, e entender o comportamento delas durante o período do estudo, para os três intervalos de classificação do índice de claridade, que é de suma importância para avaliação do desempenho e viabilidade dos projetos que envolvem a geração de energia solar. Utilizando a razão entre a irradiância global a superfície e a irradiação solar extraterrestre obtivemos o Índice de Claridade (Kt), a partir da utilização de alguns cenários de condição do céu, com foco no município de Caicó/RN (-6,4700; -37,0800), para o período entre janeiro de 2010 e dezembro de 2020, a partir de valores coletados no site SoDa e valores calculados. Os resultados obtidos através da metodologia utilizada, foi a distribuição durante um ano para um ano na análise do box-plot, onde temos os maiores valores da irradiância durante o verão austral e menores durante o inverno, já para o índice de claridade temos um domínio dos dias

de céu claro com aproximadamente 54,60% dos dias (corresponde a 2194) e menos de 1% para os dias com céu nublado (37 dias). Para o período estudado no trabalho os resultados foram satisfatórios, pois conseguimos observar um determinado padrão que se repete ao longo dos anos, os resultados representam um bom indicativo para o desenvolvimento de projetos que envolvem energia solar, mas carece de mais estudo específicos, que concederam um maior embasamento para outras pesquisas e projetos de prospecção.

PALAVRAS-CHAVE: Radiação solar, atmosfera terrestre, energias renováveis.

EVALUATION OF SOLAR RADIATION COMPONENTS AND CLARITY INDEX FOR CAICÓ, RN

ABSTRACT: The present work sought to carry out an evaluation of the behavior of the components of solar radiation, and to understand their behavior during the study period, for the three classification intervals of the brightness index, which is of paramount importance for evaluating the performance and feasibility of projects involving the generation of solar energy. Using the ratio between the global surface irradiance and the extraterrestrial solar irradiation, we obtained the Clarity Index (Kt), from the use of some sky condition scenarios, focusing on the municipality of Caicó/RN (-6.4700; - 37.0800), for the period between January 2010 and December 2020, from values collected on the SoDa website and calculated values. The results obtained through the methodology used, was the distribution during a year to a year in the analysis

of the box-plot, where we have the highest values of irradiance during the austral summer and the lowest during the winter, as for the brightness index we have a domain of clear sky days with approximately 54.60% of the days (corresponds to 2194) and less than 1% for days with cloudy skies (37 days). For the period studied in the work, the results were satisfactory, as we were able to observe a certain pattern that is repeated over the years, the results represent a good indication for the development of projects that involve solar energy, but it needs more specific study, which granted a greater basis for other research and prospection projects.

KEYWORDS: Solar radiation, Earth's atmosphere, Renewable energies.

1 | INTRODUÇÃO

A energia radiativa é a grande responsável pela energia primária que impulsiona todos os processos no planeta, tais como: a fotossíntese, os processos biológicos e meteorológicos e a energia que impulsiona o desenvolvimento das tempestades, para Souza *et al.* (2005). A radiação solar incidente sobre a atmosfera está presente todos os dias com diferentes condições, influenciando na quantidade de radiação que irá chegar até o solo durante o ciclo diurno. Quando ela atravessa a atmosfera, a radiação sofre alguns processos de interação com os componentes atmosféricos, como a reflexão, difusão e absorção. De acordo com Iqbal (1983), a radiação direta é aquela que chega até a superfície vinda diretamente do sol, já difusa é aquela dispersa ao longo do caminho e a global se refere ao valor da soma das duas componentes da radiação citadas anteriormente.

Nuvens são conjuntos visíveis de gotículas de água, poeira, fumaça e partículas de gelo, que podem estar em suspensão na atmosfera. São consideradas, de acordo com Souza Echer (2006), como um dos componentes presentes na atmosfera com a maior variação no tempo e maior efeito sobre a energia radiante que chega até o solo. Algumas literaturas, como Liu e Jordan (1960) e Rensheng *et al.* (2004), apresentam que o número ou a taxa de nuvens presentes na atmosfera, específica para um local, influencia bastante no caminho da radiação até o solo, possibilitando definir um Índice de Claridade (Kt). O índice de claridade atmosférico é definido como a razão entre a radiação solar que chega até a superfície e a radiação solar no topo da atmosfera (radiação extraterrestre). O referido índice também é conhecido na literatura, por evidenciar a condição de nebulosidade do céu, segundo Dal Pai e Escobedo (2015).

Conforme foi fundamentado por Pereira *et al.* (2017), em oposição a outras fontes convencionais de energia utilizadas, a energia solar possui uma intermitência e variabilidade espacial. Sendo assim, estudos sobre o recurso solar são essenciais para impulsionar a utilização dessa forma de energia. O conhecimento sobre a quantidade de energia que chega ao solo e suas variações ao longo do ano, que são importantes na avaliação de projetos de energia solar e no que se refere ao registro dos dados, de acordo com Abdullahi e Nasir (2014), eles são considerados ferramentas indispensáveis para pesquisas interdisciplinares como a previsão do rendimento de uma determinada cultura

ou também como uma ferramenta para medição das alterações climáticas. Mediante a isso, esse trabalho buscou realizar uma avaliação do comportamento das componentes da radiação solar, calculando e utilizando três dos cenários propostos pelo índice de claridade atmosférica, no contexto de nebulosidade ou condição de céu claro para o período de janeiro de 2010 até dezembro de 2020 na cidade de Caicó, no estado do Rio Grande do Norte.

2 | MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de Estudo

A área de estudo está localizada no município de Caicó (Latitude: -6,4700; Longitude: -37,0800), no estado do Rio Grande do Norte (Fig. 1). A coordenada utilizada para a coleta dos dados baseou-se na localidade da estação meteorológica convencional do SERIDÓ (código: 82690), disponibilizada pelo site do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Essa escolha se deu em função da presença de uma estação já instalada, o que serve como indicativo da existência de um ambiente apropriado para a coleta dos dados. O município fica situado na microrregião do Seridó Ocidental (IBGE, 1990), com uma extensão territorial de 1.288,584 km², tendo a localidade de coleta exata uma altitude de 155m em relação ao nível médio do mar. A região possui uma vegetação de Caatinga, segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2021), apesar de estar localizada em uma zona de transição entre a caatinga Hiperxerófila e a Subdesértica, de acordo com Beltrão *et al.* (2005). Em um trabalho de Alvares *et al.* (2014), foi proposta uma classificação para o Brasil baseado nos critérios de Köppen, analisando a localidade escolhida, e aplicando essa classificação, entende-se que a localização é do tipo Bsh, o que indica que a cidade é localizada em uma região seca, tipo semiárido de baixa latitude e baixa altitude. Devido à escassez de chuvas, possui baixa nebulosidade, o que impacta diretamente na quantidade de radiação que chega até a superfície. Dessa forma, há forte insolação e temperatura média anual sempre acima de 18°C. Segundo o Instituto de Desenvolvimento do Rio Grande do Norte (IDEC, 1991), a precipitação pluviométrica média anual é maior que 800 mm e sua temperatura média anual fica acima dos 27,4°C.

LOCALIZAÇÃO DE CAICÓ, RN, BRASIL

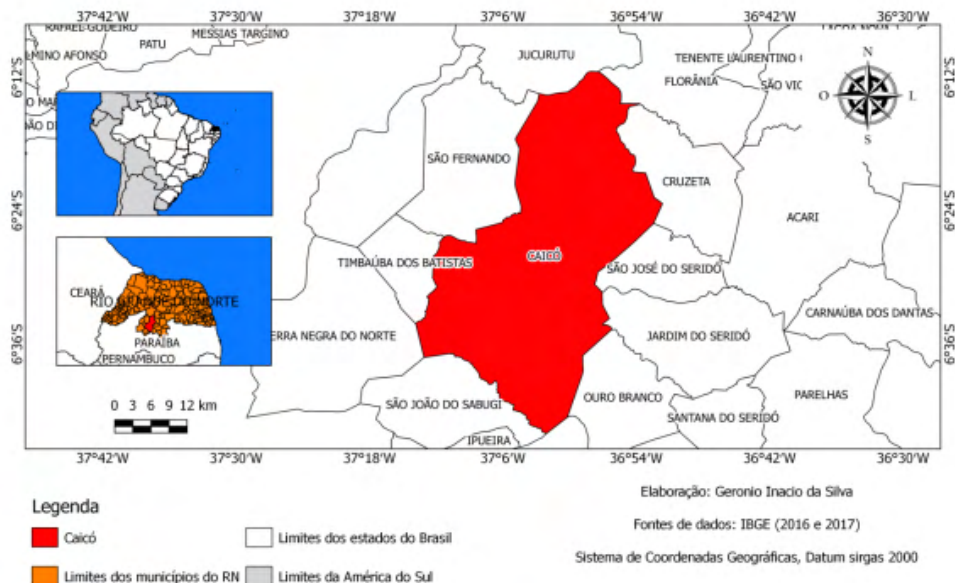


Figura 1 - Mapa da localização da área de estudo no município de Caicó, RN - Brasil.

Fonte: SILVA, 2020.

2.2 Dados Utilizados

Os valores utilizados no presente trabalho advêm das variáveis irradiância Global Horizontal (GHI), irradiância Difusa Horizontal (DHI) e a irradiância Direta Horizontal (BNI), todas foram coletadas do *Solar Energy Services for Professionals*, site *Solar Radiation data* (SoDa) na aba de serviços web na secção *CAMS Radiation Copernicus*. O SoDa, segundo Santos (2020), é um projeto de origem europeia financiado por uma Comissão Europeia no ano de 1999. Atualmente, é um banco de dados disponibilizado gratuitamente que fornece séries temporais calculadas a partir de dados de satélite, de irradiações globais, difusas e diretas na superfície horizontal, para condições climáticas reais, bem como em condições de céu claro, para a Europa, África, Oceano Atlântico e Oriente Médio, com resolução espacial de 3 km em Nadir e aproximadamente 4 a 5 km em 45° de latitude, sendo todas elas na unidade de (Wh/m²). Foram utilizadas outras informações, tais como a latitude local, o ângulo solar ao meio dia e ao pôr do sol e o dia do ano, consultados com base no calendário juliano para todos os dias entre 2010 e 2020, totalizando 4018 observações. Em razão dos valores serem obtidos através de dados de satélite, a série não possui falhas.

2.3 Cenários de Nebulosidade

Os cenários utilizados no referido trabalho foram definidos com base no Índice de Claridade (Kt), que trata-se de um número sem dimensão que varia de acordo com a quantidade de aerossóis e nuvens presentes na atmosfera em um dado momento, considerando a diminuição das componentes difusa ou direta da radiação solar que chega até a superfície terrestre, possibilitando classificar o céu de acordo com a sua nebulosidade, o que foi proposto por Tavares (2005).

Para estimar o valor de H₀, utiliza-se a Eq. (1) proposta por Duffie e Beckman (2013), calculada em função da constante solar (G_{sc} = 1367 W/m²), latitude (φ), ângulo solar (δ) ao meio-dia com relação ao plano do Equador, ângulo do pôr do sol (ω_s) e o dia do ano com base no calendário juliano (N).

$$H_0 = \frac{24}{\pi} \cdot G_{sc} \cdot \left[1 + 0,033 \cdot \cos \left(\frac{360N}{365} \right) \right] \cdot \left(\cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \sin \omega_s + \frac{\pi \omega_s}{180} \cdot \sin \varphi \cdot \sin \delta \right) \quad (1)$$

Utilizando a Eq. (1), a partir dos resultados e dos valores medidos de H, a classificação de cobertura do céu aplicada foi uma modificação proposta por Escobedo *et al.* (2009), onde foram estabelecidos alguns cenários, céu nublado ($0,35 \geq Kt \leq 0,55$) e céu parcialmente claro ($0,55 \geq Kt \leq 0,65$) que foram combinados. Foi utilizado, no referido trabalho, as categorias definidas como: céu nublado ($Kt < 0,35$), céu com cobertura intermediária ($0,35 \geq Kt \leq 0,65$) e céu claro ($Kt > 0,65$). Assim, é proposta uma classificação para todos os anos do estudo e também isolada para cada mês, a fim de identificar a presença de possíveis períodos predominantes para a classificação.

Possuindo os valores de H e H₀ tem-se a classificação dos valores de Kt. Assim, é possível aplicá-lo para cada um dos dias abordados no estudo. Para tal, utiliza-se a Eq. (2), onde H que é a irradiação solar global e H₀ a irradiação solar global extraterrestre, ambas com frequência diária e no plano horizontal.

$$Kt = \frac{H}{H_0} \quad (2)$$

3 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Componentes Solares

Os valores diários foram coletados durante o período entre janeiro de 2010 e dezembro de 2020. Na Fig. 2 são apresentados os comportamentos: da irradiação solar global referente à linha azul, dos ciclos da irradiância global extraterrestre calculada através da Eq. (1) e a coletada a partir das informações obtidas por satélite, referentes à linha vermelha e amarela, respectivamente. Dessa forma, foram representados esses

comportamentos sobre a localidade em questão para um período de aproximadamente 11 anos, pois com um maior período de estudo há uma maior confiabilidade nos resultados obtidos.

Os valores da irradiação extraterrestre, que é um fluxo por unidade de área, foram abordados de duas diferentes formas: o segmento vermelho, que representa a irradiação calculada através da Eq. (1), e os valores do segmento amarelo, pertence à mesma variável obtida a partir dos dados de satélite. Ambos possuem valores muito próximos e comportamento sazonal estatisticamente idênticos, havendo apenas um pequeno distanciamento nos pontos de picos e vales. Há a presença de um grande vale durante o inverno, um aumento no período de outono e, durante o pico presente no verão, ocorre uma diminuição momentânea, que torna a aumentar. Tal comportamento também é observado no segmento azul com os valores da irradiação global, tal qual possui o mesmo comportamento sazonal presente nos segmentos anteriormente citados. Porém, ele possui uma maior variação em decorrência à sua interação com os componentes atmosférico, os quais possuem bastante variação ao longo de um curto período, ficando com os seus valores máximos por volta de 7500 Wh/m², enquanto que seu mínimo ficou abaixo de 2500 Wh/m² em pontos específicos dos anos de 2017 e 2019.

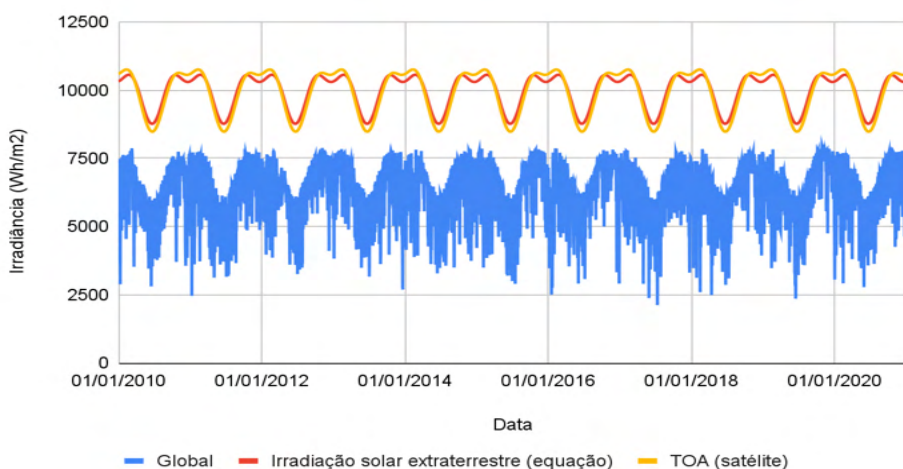


Figura 2 - Fluxo da radiação no topo da atmosfera (equação e satélite) e global entre 2010 e 2020.

Com auxílio da Fig. 3 é apresentado um box-plot, dividindo os anos mensalmente para obter uma análise mais assertiva sobre o comportamento anual da irradiação difusa em Wh/m². Num primeiro momento buscou-se destacar o comportamento do ciclo anual da variável, da mesma forma que foi apresentado recentemente por Fernando *et al.* (2019). O ciclo da variável registrou os maiores valores durante o verão austral, e os menores durante

o período do inverno. Isso ocorre devido à sazonalidade e à declinação solar, que são consequência dos movimentos de rotação e translação da terra. Nos meses de dezembro, janeiro, fevereiro e março, foram observados no gráfico os valores máximos da série, com os valores por volta de 3500 Wh/m² e superiores, junto com as maiores médias e também os mais elevados mínimos valores, próximo dos 1000 Wh/m², destacando que nos meses de dezembro à março, a média ficou acima do valor da mediana. Porém, deve-se observar que nos citados meses do verão houve uma alta dispersão dos valores dentro do mês, que pode ser verificada através do tamanho das caixas do Box-plot (Fig. 3), onde os valores do 1° quartil e 3° quartil, que representam respectivamente os valores de 25% e 75% das observações, ficam a uma meia distância da mediana, a qual divide o gráfico em dois, com 50% acima e 50% abaixo.

Com o final do verão e o início do outono entre março e abril, os valores da componente difusa da radiação começam a diminuir a partir da estação de transição, que ocorre entre o final de março e início de junho, em direção ao inverno, a diminuição observada nos valores do gráfico é de 7,14% nos valores máximos e mínimos para o mês de abril. Após esse período de declínio, é verificado que, os meses de junho e julho possuem os menores valores da componente difusa durante os meses citados, de modo que a máxima, média e mínima são as menores. Entretanto, destaca-se também a diferença entre os meses, pois possuem comportamentos internos diferentes. Por exemplo, em julho a amplitude é maior que o antecessor, tendo a média e a mediana maiores. Antes do aumento do verão passasse pela primavera, outra estação de transição. Todavia, durante esse período, os valores são ascendentes, como é possível observar nos meses de setembro, outubro, novembro e no início do mês de dezembro.

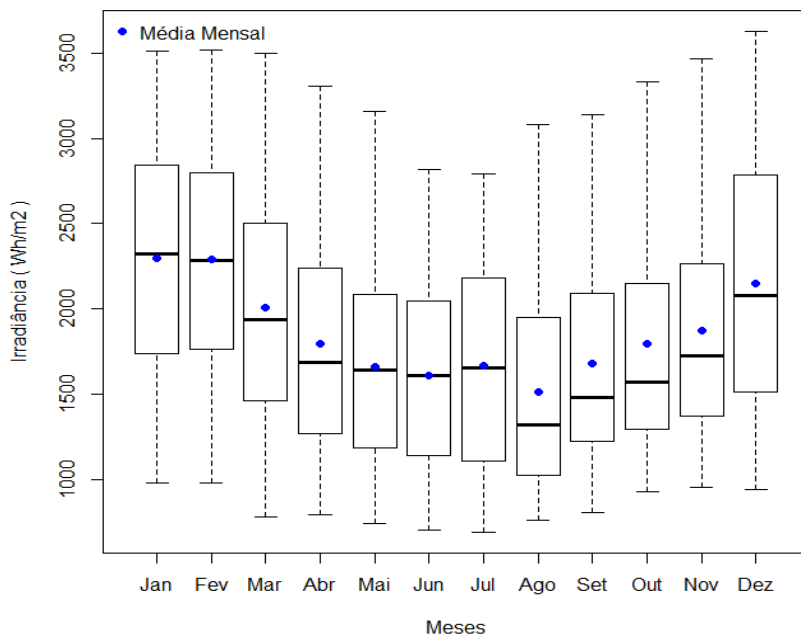


Figura 3 - Box-plot mensal da Irradiância Difusa (Wh/m²) de janeiro de 2010 a dezembro de 2020.

Através da análise visual da Fig. 4, observa-se que a componente direta tem um comportamento bastante diferente daquilo que foi observado nas global e difusa, as quais possuem um comportamento sazonal com maiores valores no verão e menores no inverno e, devido à relação entre a direta e a difusa, mostraram-se inversamente proporcionais durante a análise dos dados e de outros trabalhos que contêm as mesmas variáveis. Em todos os meses tem-se uma média sempre abaixo da mediana, e essa situação é causada devido os valores mínimos estarem muito distante do limite do primeiro quartil. Ou seja, a presença de outliers, que são valores discrepantes na série, presente nos meses de abril, maio, e entre agosto a novembro, de modo que no mês de outubro é apresentada a maior quantidade de valores atípicos.

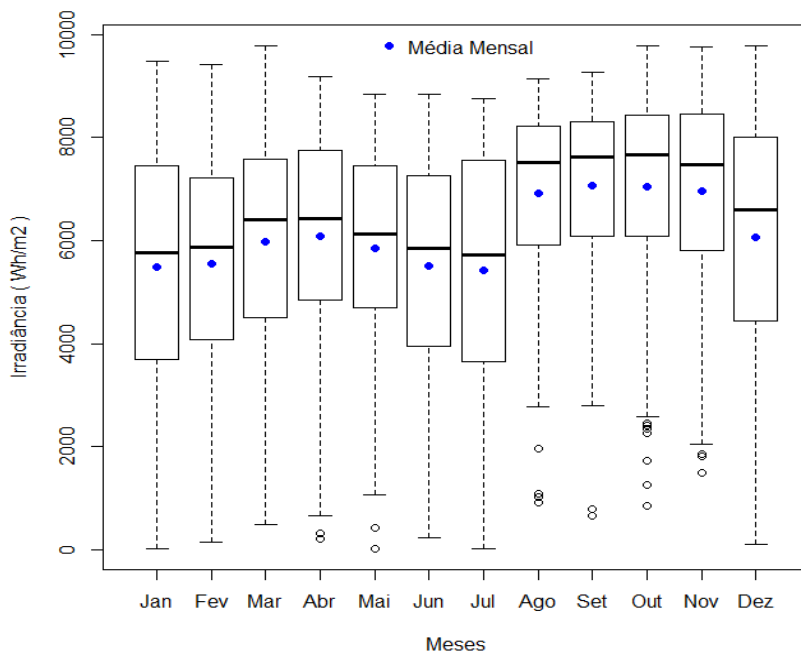


Figura 4 - Box-plot mensal da Irradiância Direta (Wh/m²) de janeiro de 2010 a dezembro de 2020.

3.2 Índice de Claridade(falta falar sobre o número de dias)

Na Fig. 5 está representada uma distribuição das irradiâncias em função do Kt. Para o período que foi estudado, calculou-se o índice de Kt, e o mínimo para todo o tempo estudado encontrado foi o valor de 0,2375 no dia 10 de janeiro de 2011. Tal valor representa uma condição de céu nublado, que pode ser identificado a partir do valor de 0,35, de modo que, quanto menores os valores, mais nebulosa é a condição do céu no ponto em que o estudo foi aplicado. O valor máximo foi de 0,7605 no dia 30 de outubro de 2019, indicando uma condição de céu claro, estabelecida a partir do valor de 0,65 de Kt. Tal comportamento também foi observado em um trabalho feito recentemente por Rondón, Ducati e Haag (2020), onde para apenas um ano e em uma localidade diferente foi observado um comportamento relativamente próximo.

Quando abordamos a Fig. 5 para os valores do intervalo de $Kt < 0,35$ a global e a difusa são praticamente iguais, ou seja, os pontos são quase sobrepostos. Já a direta fica com valores muito próximos de zero, o que é um indicativo de condição de céu nublado. No segundo ponto do índice, $0,35 \geq Kt \leq 0,65$, existe uma proximidade entre os valores da global, direta e difusa, no valor de 0,40 de Kt que é uma condição de céu com cobertura intermediária, ao avançarmos até o valor de 0,50 começamos a observar um afastamento dos pontos da direta e da difusa. O comportamento das duas é distinto, pois a direita

aumenta o seu valor em Wh/m² juntamente com o aumento do índice de claridade, enquanto que a difusa possui um comportamento inversamente proporcional ao aumento do índice de claridade, ou seja, quando uma aumenta a outra diminui.

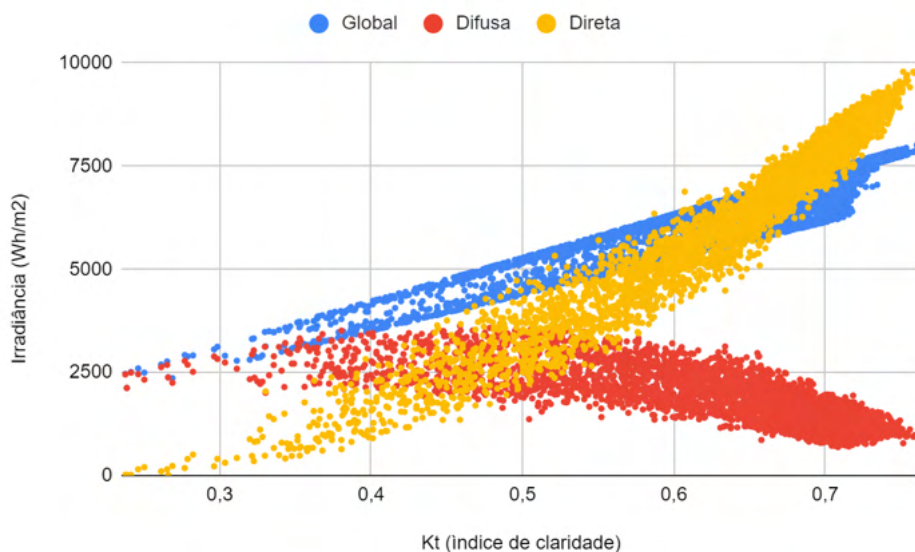


Figura 5 - Distribuição da irradiância global, difusa e direta em função de Kt.

Na Fig. 6 é apresentado um histograma de frequência em função do índice de claridade (Kt), foram delimitadas duas linhas verticais no gráfico. A primeira delas, a azul, localiza-se no ponto onde Kt é igual a 0,35, e a segunda, na cor ciano, está localizada em Kt igual a 0,65. Abaixo da linha azul é aplicada a condição de céu nublado, entre as duas linhas a condição é de céu com cobertura intermediária, e após da linha da cor ciano são indicados os dias de céu claro. A análise do histograma buscou focar na distribuição dos dados, apresentando a frequência da ocorrência de uma determinada condição do céu de acordo com o índice calculado. Na primeira das três faixas de classificação do índice Kt < 0,35, antes da linha azul, aquela que indica que temos dias de céu claro, verificou-se que para o período de estudo, entre 01 de janeiro de 2010 e 31 de dezembro de 2020, há menos de 1% dos dias incluídos em tal classificação, aproximadamente 0,92% dos dias.

A segunda classificação, que está localizada entre os valores de $0,35 \geq Kt \leq 0,65$, representa os valores do índice para o céu com cobertura intermediária, e está localizada entre as linha azul e ciano, onde nela, bem como no primeiro intervalo observou-se um aumento nos valores de frequência. Nesta faixa, tem-se um total de aproximadamente 44,47% dos valores para um total de 4018 dias presentes na Fig. 6.

Os valores de Kt acima de 0,65, é a terceira classificação dos valores calculados

para o índice de claridade. Tem-se o maior número de valores para o índice, na distribuição os valores aumentam e atingem o pico da frequência a partir dos valores por volta de 0,70. Os dias classificados como de céu claro representam aproximadamente 54,60% dos dias, tendo como seu valor máximo em kt igual a 0,76.

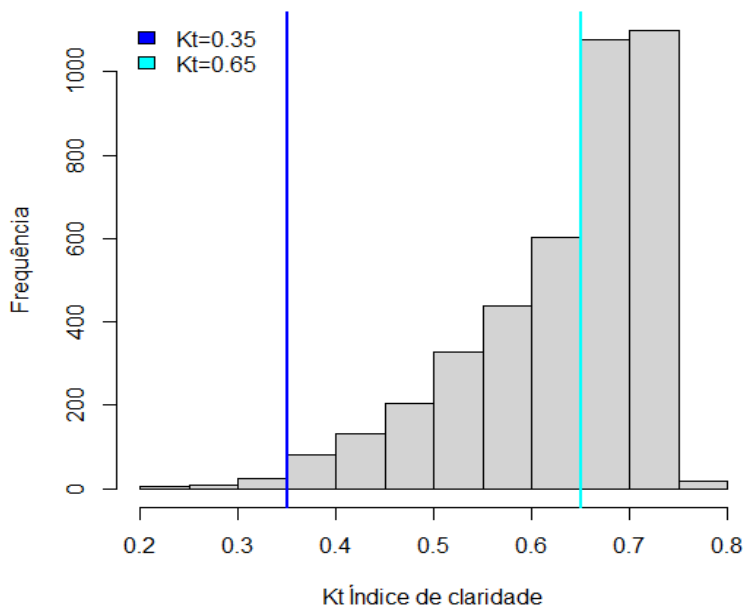


Figura 6 - Histograma de frequência do índice de claridade (Kt) para os anos de 2010 a 2020.

4 | CONCLUSÕES

O presente trabalho mostrou os resultados para as componentes da radiação e índice de claridade atmosférica para o período entre 2010 e 2020. A variação das componentes obedece um comportamento esperado pelo observado em outros trabalhos realizados para a região. As variações são influenciadas principalmente pelos movimentos de rotação, translação da Terra, declinação do eixo terrestre e da nebulosidade em alguns dias que são dominados por céu nublado, pois foi observado que menos de 1% dos dias apresentaram condição de céu nublado, a qual influencia muito na quantidade de radiação que chega até o solo. Mesmo unindo-a com os dias de cobertura intermediária, não supera o total de dias com condição de céu claro, com aproximadamente 54,60%. Considera-se então que, devido aos resultados presentes no estudo, para um período de mais de 10 anos, a cidade possui um número de dias consideráveis com condição de céu claro. Nesse sentido, o município de Caicó mostrou-se como uma localidade com alto potencial para a geração de energia solar durante todo o ano, com destaque para o verão. Como sugestão para trabalhos futuros, é recomendada a aplicação da condição de céu claro,

bem como a de outras equações que possam estimar os valores da radiação que chega ao solo, simulações de rendimento de geração de energia solar e indicação das melhores localidades para instalação de um sistema.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal do Rio Grande do Norte e ao Departamento de Ciências Atmosféricas e Climáticas pelo apoio no desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

Abdullahi, M. e Nasir, M., 2014. Evaluation of monthly total global and diffuse solar radiation in Ibi, Taraba state, Nigeria. Pelagia Research Library. Advances in Applied Science Research, vol. 5, n. 2, pp 144-148.

ALVARES, Clayton Alcarde et al. Köppen's climate classification map for Brazil. Meteorologische Zeitschrift, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

Área territorial brasileira 2020. Rio de Janeiro: IBGE, 2021. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/rn/caico.html>>. Acesso em: 17 de Fevereiro de 2022.

BELTRÃO, B. A.; ROCHA, D. E. G. A.; MASCARENHAS, J. C.; SOUZA JUNIOR, L. C.; PIRES, S. T. M.; CARVALHO, V. G. D. Projeto Cadastro de Fontes De Abastecimento Por Água Subterrânea Estado Do Rio Grande do Norte: Diagnóstico do Município De Jardim de Piranhas. 2005.

CPRM - Serviço Geológico do Brasil. Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea. Diagnóstico do município de Caicó, estado do Rio Grande do Norte / Organizado [por] João de Castro Mascarenhas, Breno Augusto Beltrão, Luiz Carlos de Souza Junior, Saulo de Tarso Monteiro Pires, Dunaldson Eliezer Guedes Alcoforado da Rocha, Valdecílio Galvão Duarte de Carvalho. Recife: CPRM/PRODEEM, 2005.

DAL PAI, E.; ESCOBEDO, J. F. Estimativa da radiação atmosférica em função dos índices radiométricos K_t e K_d para Botucatu-SP. Energia na agricultura, Botucatu, vol.30, n.2, p. 172-179, abril-junho, 2015.

DA SILVA, Geronio Inacio et al. Influência da arborização na modificação microclimática em cidades de pequeno porte do Semiárido brasileiro: o estudo de caso de Caicó. Revista Geografica Academica, v. 14, n. 1, p. 94-105, 2020.

De Souza, J., Mendonça, R. e Lima, M., 2005. Global solar radiation measurements in Maceió - Brazil. Renewable Renewable Energy, vol. 30, pp. 1203-1220.

De Souza, Echer., Martins, F., Pereira, E., 2006. A importância dos dados de cobertura de nuvens e de sua variabilidade: Metodologias para aquisição de dados. Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 28, n. 3, pp. 341-352.

Duffie, J., Beckman, W., 2013. Solar engineering of thermal processes. Fourth Edition. Wiley.

Escobedo, J., Gomes, E., Oliveira, A. e Soares, J., 2009. Modeling hourly and daily fractions of UV, PAR and NIR to global solar radiation under various sky conditions at Botucatu, Brazil. *Applied Energy*, vol. 86, pp. 299–309.

FERNANDO, Domingos Mário Zeca et al. IRRADIAÇÃO SOLAR GLOBAL PARA CIDADE DE MAPUTO-MOÇABIQUE: EVOLUÇÃO TEMPORAL DAS MEDIDAS E MODELAGEM ESTATÍSTICA. *ENERGIA NA AGRICULTURA*, v. 34, n. 01, p. 82-93, 2019.

IDEC. Açudes Públicos do Rio Grande do Norte. Características Físicas e Técnicas – Fundação Instituto de Desenvolvimento do Rio Grande do Norte. Natal/RN, 1991.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) (1990). Divisão regional do Brasil em mesorregiões e microrregiões geográficas (PDF). Biblioteca IBGE. 1: 44–47.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). Banco de dados meteorológicos para ensino e pesquisa. 2021.

Liu, B., Jordan, R., 1960. The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation.

Solar Energy, Washington, vol. 4, n. 3, pp. 1–19.

IQBAL, M. Ground Albedo. *An Introduction To Solar Radiation*; Academic Press: Toronto, Canada, p. 281-293, 1983.

PEREIRA, E. B. et al. Atlas Brasileiro de Energia Solar. São José dos Campos: INPE, 2017.

R Development Core Team (2009). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <<http://www.R-project.org>>.

Rensheng, C., Ersi, K., Jianping, Y., Shihua, L., Wenzhi, Z. e Yongjian, D., 2004. Estimation of horizontal diffuse solar radiation with measured daily data in China. *Renewable Energy*, vol. 29, pp.717–726.

RONDÓN, Adriana Coromoto Becerra; DUCATI, Jorge Ricardo; HAAG, Rafael. ANÁLISE ANUAL DAS COMPONENTES DIRETA, DIFUSA E GLOBAL DA RADIAÇÃO SOLAR EM PORTO ALEGRE, RS. In: **VII Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS 2018**. 2020.

Santos, Hugo Francisco Lisboa, et al. “QUE FONTE DE DADOS METEOROLÓGICOS UTILIZAR NO BRASIL? QUE INCERTEZA ESPERAR? UMA COMPARAÇÃO ENTRE DIFERENTES ABORDAGENS E VARIADAS FONTES DE DADOS.” VII Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS 2018 . 2020.

SoDa. **Solar Radiation data**. Disponível em: <<http://www.soda-pro.com/web-services/radiation/cams-radiation-service>>. Acesso em: 10 Dezembro de 2021.

Tavares, P. 2005. Observação e análise da radiação solar global e fotossinteticamente ativa na região de Maceió. Trabalho Final de Graduação. UFA. Maceió.

A IMPORTÂNCIA DA NOTAÇÃO CIENTÍFICA E DAS UNIDADES DE MEDIDAS PARA UM APRENDIZADO MAIS SIGNIFICATIVO NO ENSINO DE FÍSICA: PROPOSTA DE INTERVENÇÃO PEDAGÓGICA

Data de aceite: 01/09/2022

Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua

Doutor em Química pela Universidade Federal de Uberlândia
Pós-doutor em Química pela Universidade Federal de Uberlândia
Instituto de Química
Uberlândia – Minas Gerais - Brasil
<http://lattes.cnpq.br/12970002659897780>
<https://orcid.org/0000-0003-3587-486X>

Marilene Aparecida Fernandes Pereira

Especialista em psicopedagogia pelas Faculdades Integradas de Jacarepaguá
Professora da Escola Estadual Amir Amaral Patrocínio – Minas Gerais - Brasil
<http://lattes.cnpq.br/5144647998819160>

José Domingos de Oliveira

Especialista em Ensino de Ciências e Matemática pelo Instituto Federal do Triângulo Mineiro/*campus* Uberlândia, Uberlândia – Minas Gerais – Brasil Professor de Biologia do Colégio Aprov. LTDA Catalão – Goiás - Brasil
<http://lattes.cnpq.br/8899369930077820>

Zilanda Veríssimo da Silva

Tutora de EAD da Faculdade Única de Ipatinga Ipatinga – Minas Gerais – Brasil
<http://lattes.cnpq.br/4679921887504394>

RESUMO: O período de pandemia do COVID-19 abalou completamente o mundo que se viu impotente diante um vírus que ocasionou milhares de óbitos. No Brasil, todos os segmentos

da sociedade foram afetados e influenciou diretamente a vida de toda a sociedade, ocasionando a mudança de hábitos de forma radical. Neste sentido, a educação básica se viu diante de uma mudança drástica ao sair do ensino presencial para o formato a distância e, posteriormente, ao modelo remoto. No entanto, toda a comunidade escolar não foi instruída e sequer recebeu apoio do poder público em relação à capacitação dos professores e o suporte aos alunos e familiares em relação à aquisição de aparelhos e serviços de internet. Como resultado, os dois anos de pandemia resultaram na perda total de dois anos letivos de qualquer série da educação básica. No ensino de física, inúmeros trabalhos apresentaram estudos nos quais pesquisadores procuraram associar metodologias ativas e adaptadas ao cenário de ensino remoto, os resultados foram bastante promissores e satisfatórios, mas não o suficiente para suprir déficits de aprendizagem em conhecimentos que são pré-requisitos para uma aprendizagem mais significativa, entre os quais os conceitos e operações básicas com números na forma de notação científica e unidades de medida. Este trabalho tem por objetivo apresentar uma proposta de intervenção pedagógica voltada para alunos do ensino médio da rede pública estadual de ensino, comparando dez instituições presentes em dez contextos diferentes e verificar os possíveis motivos para a obtenção de diferentes resultados que possam ser obtidos a partir da avaliação diagnóstica. Além disso, esta proposta apresenta algumas sugestões de atividades que possam ser trabalhadas de forma paralela ao longo do ano letivo.

PALAVRAS-CHAVE: Proposta de intervenção pedagógica, avaliação diagnóstica, ensino de física, notação científica, unidades de medida.

THE IMPORTANCE OF SCIENTIFIC NOTATION AND UNITS OF MEASUREMENT FOR A MORE SIGNIFICANT LEARNING IN PHYSICS TEACHING: A PEDAGOGICAL INTERVENTION PROPOSAL

ABSTRACT: The COVID-19 pandemic period completely shook the world, which found itself powerless in the face of a virus that caused thousands of deaths. In Brazil, all segments of society were affected and directly influenced the life of the whole society, causing a radical change in habits. In this sense, basic education was faced with a drastic change when it left face-to-face teaching for the distance format and, later, the remote model. However, the entire school community was not instructed and did not even receive support from the government in relation to the training of teachers and support for students and families in relation to the acquisition of devices and internet services. As a result, the two-year pandemic resulted in the total loss of two academic years of any grade of basic education. In physics teaching, numerous studies have presented studies in which researchers sought to associate active methodologies adapted to the remote teaching scenario, the results were quite promising and satisfactory, but not enough to address learning deficits in knowledge that are prerequisites for a more meaningful learning, including basic concepts and operations with numbers in the form of scientific notation and units of measurement. This work aims to present a proposal for a pedagogical intervention aimed at high school students from the state public school system, comparing ten institutions present in ten different contexts and verifying the possible reasons for obtaining different results that can be obtained from the diagnostic evaluation. In addition, this proposal presents some suggestions for activities that can be worked on in parallel throughout the school year.

KEYWORDS: Proposal of pedagogical intervention, diagnostic evaluation, teaching of physics, scientific notation, measurement units.

1 | INTRODUÇÃO

O ensino das Ciências da Natureza (Biologia, Física e Química) é a área na qual se encontra debates tanto em relação à proposta de metodologias ativas que facilitem o processo de aprendizagem, quanto recebe críticas de alunos do ensino fundamental II e médio que alegam se tratar de áreas do conhecimento em que é puramente abstrato e não possui nenhuma correlação e importância no contexto dos estudantes e na comunidade na qual a escola se insere. Entretanto, estas disciplinas são tratadas com enorme descaso pelo poder público, visto que necessitam de recursos e infraestrutura para que possa ser evidenciada na prática, proporcionando ao aluno associar a teoria com a prática e, conseqüentemente, levar o aluno a condição de sujeito ativo e responsável pelo seu próprio processo de aprendizagem e contextualização além do que se aprende na escola. No entanto, as instituições públicas se deparam com enormes dificuldades, entre as quais: i) falta de profissionais com curso de licenciatura na área; ii) a baixa remuneração, a falta

de uma carreira que valorize e estimule os docentes em exercício a continuar atuando como professor em sala de aula; *iii*) a falta de recursos tecnológicos, laboratórios e visitas técnicas, que se limita ao quadro/lousa e o livro didático como os únicos recursos a serem utilizados no processo de ensino-aprendizagem destas áreas do conhecimento (FÁVARO et al., 2020; KRAUSE; SANTOS, 2022; MORAES; OLIVEIRA, 2022; TAVARES; SILVA; CHESMAN, 2022).

O ensino de física, além de todos os problemas apresentados e discutidos no parágrafo anterior, convive com o fato de ser a área que possui a maior defasagem com professores habilitados, na qual as aulas são oferecidas aos docentes da área de matemática, química e até ciências biológicas. Além disso, mesmo com a expansão e interiorização de unidades de Institutos e Universidades Federais, não se conseguiu ainda suprir a elevada demanda de professores habilitados em física em função do: *i*) baixo interesse de jovens pela carreira docente na física; *ii*) elevados níveis de evasão de alunos matriculados nos cursos de licenciatura em física por todo o país; *iii*) aumento de cursos de licenciatura ou formação complementar como segunda licenciatura na modalidade EAD em cursos ofertados de forma totalmente online e desprovidas de encontros e práticas presenciais e; *iv*) a falta de infraestrutura são alguns dos inúmeros motivos que contribuem pela escassez de professores de física em todo o Brasil (JESUS et al, 2022; JUST; NECKE, 2020; MACHADO; SILVA; FONTELLA, 2021). O reflexo de todas estas questões são sentidas e vivenciadas no âmbito escolar, dificultando o processo de ensino-aprendizagem levando o aluno à aversão por esta importante área da ciência. Como consequência, os alunos concluem o ensino médio com um grande déficit de aprendizagem não só em física, mas como também em química e matemática (JUST; NECKE, 2020; MACHADO; MARCELINO, 2020; MACHADO; SILVA; FONTELLA, 2021; TUPAN et al.,2021).

Entre março de 2020 até dezembro de 2021, o Brasil enfrentaria um dos piores momentos da história: a pandemia do COVID-19. O segmento da educação foi totalmente afetado, passando do ensino presencial para o a distância e, posteriormente, o remoto. Professores, alunos e familiares se viram na condição de estabelecer um novo formato de ensino, no qual ninguém estava preparado para trabalhar de forma tão precária e sem nenhuma orientação. Os alunos passaram a buscar atividades na escola e/ou imprimir por meio do envio de grupos de whatsapp criado para cada turma e série escolar. Diante disso, o ensino de física ficou mais abstrato do que já era antes da pandemia, os alunos tiveram que buscar uma autonomia de estudo na qual nunca foi utilizada no ensino médio. Em função da falta de incentivo por parte do poder público, muitos alunos ficaram sem condições de aprender física, bem como os seus pré-requisitos que foram afetados, tais como: a notação científica e as unidades de medidas (BELLEMAIN; BIBIANO; SOUZA, 2020; QUADROS; VILLAS-BOAS, 2020; VILELA; FERRAZ; ARAÚJO, 2021).

Neste sentido, os educadores passaram a considerar que os alunos apresentavam um déficit de aprendizagem de dois anos letivos, que prejudicaram grandemente o processo

de ensino-aprendizagem que passou a ser sentido no retorno as atividades presenciais ocorridas no presente ano. Logo, é de suma importância que a comunidade escolar possa rever tanto o projeto político pedagógico, quanto os planejamentos de ensino em todas as áreas do conhecimento (BRAGA; GONÇALVES; LAMEU, 2021; GARCIA; SOLTAU, 2021; GONÇALVES; DENARDIN, 2021; NAVARRO; ARGUEDAS-MATARRITA, 2020). Diante disso, o ensino de física necessita propor projetos de intervenção pedagógica que leve em consideração o déficit de aprendizado ocorrido nos anos de 2020 e 2021 que trouxeram consequências e prejuízos na formação do aluno que irá refletir por inúmeros anos e em todas as séries da educação básica (AGUIAR; MOURA; BARROSO, 2022; BORDIN et al., 2020; BRAGA; GONÇALVES; LAMEU, 2021; CATARINO; REIS, 2021).

Diante disso, este Projeto de Intervenção Pedagógica (PIP) tem por objetivo diagnosticar as dificuldades de alunos do primeiro ao terceiro ano do ensino médio em relação à aprendizagem dos conceitos envolvidos no estudo da notação científica e unidades de medida, por meio da aplicação de uma avaliação diagnóstica a ser realizada em dez instituições de ensino da rede pública estadual localizadas no município de Uberlândia e distribuídas da seguinte forma: *i)* escolas em bairros periféricos; *ii)* escolas em bairros centrais ou localizados em regiões no qual as pessoas possuem maior poder aquisitivo; *iii)* escolas nos distritos de Uberlândia e; *iv)* escolas em áreas rurais. O questionário é constituído por vinte perguntas objetivas de múltipla escolha e que pretende avaliar as condições socioeconômicas nas quais os alunos se encontram inseridos, e questões que procuraram trabalhar as operações e propriedades de notação científica e unidades de medida utilizadas em larga escala no ensino de física do ensino médio.

2 | OBJETIVOS

2.1 Geral

Realizar um diagnóstico em relação ao nível de conhecimento sobre notação científica e unidades de medidas no contexto do ensino de física para alunos do ensino médio matriculados em escolas estaduais localizadas no município de Uberlândia/MG.

2.2 Específicos

- Realizar um diagnóstico por meio de uma avaliação constituída de vinte questões divididas em duas partes: *i)* questões de 1 a 6 abordarão condições socioeconômicas em relação ao contexto no qual o aluno se insere e; *ii)* questões de 7 a 20, se constituem de exercícios de múltipla escolha em relação ao tema em comento;
- A partir da correção da avaliação diagnóstica, comparar os resultados entre as diferentes séries da mesma escola e, posteriormente, apresentar dados comparando uma escola com a outra;

- Realizar um levantamento em relação às possíveis causas que possam influenciar no baixo desempenho dos alunos, entre as quais: a pandemia do COVID-19 (entre mar./2020 até dez./2021); as questões socioeconômicas vivenciadas pelos alunos e seus familiares durante a pandemia e;
- Realizar uma análise em relação aos conceitos explorados na avaliação diagnóstica e que possam resultar em um PIP no ensino de física de forma a promover o aluno a sujeito ativo de seu próprio aprendizado.

3 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Conceituação de Alfabetização (AC) e Letramento Científico (LC)

A partir do surgimento de discussões, no final da década de 90, em torno de questões ambientais, tais como: aquecimento global, detecção de substâncias com potencial ou real efeito toxicológico em matrizes aquáticas, desmatamento, aumento da queima de combustíveis fósseis e os efeitos provenientes destas atividades antrópicas, trouxeram a necessidade de atribuir novos significados entre os quais a interdisciplinaridade do que se ensinava e a importância de sua contextualização (AMARAL; ROSA; LOCATELLI, 2019; RAMOS et al., 2020; SANTOS; SOUZA, 2020). Além disso, a mudança da grade curricular com a inserção da atividade científica fez com que surgisse o debate, a concepção e a aplicação do conceito de AC e LC (CUNHA, 2017; GOMES; SANTOS, 2018; SASSERON; CARVALHO, 2011).

Lorenzetti e Delizoicov (2001) adotam a expressão de AC como sendo a forma de apresentar uma abordagem direcionada para o contexto do letramento e que o uso deste seja capaz de fazer as pessoas o utilizarem em diferentes contextos sociais. Os autores afirmam que não existe a necessidade de saber ler e escrever para a construção do conhecimento científico na educação básica. Além disso, o LC está além da AC visto que o primeiro está relacionado à forma como as pessoas utilizarão os conhecimentos científicos de forma a melhorar sua própria vida ou auxiliar em decisões frente a um mundo em movimento e mudança de forma contínua. Norris e Philips (2003) apud Santos (2007) destacam que a AC e o LC devem ser levados em consideração vários aspectos, entre os quais: *i)* conhecimento científico e habilidade de distinguir ciência de senso comum; *ii)* compreensão da ciência e suas múltiplas aplicações; *iii)* conhecimento do significado de ciência; *iv)* independência no processo de aprendizagem; *v)* habilidade em aplicar o conhecimento científico na solução de problemas; *vi)* conhecimento necessário para interagir de forma participativa em questões sociais com relação a ciência; *vii)* compreensão da natureza com a ciência, incluindo as suas relações com a cultura; *viii)* apreciação do conforto da ciência, incluindo a curiosidade despertado por ela; *ix)* riscos e benefícios oferecidos pelo conhecimento científico; *x)* habilidade para pensar criticamente sobre ciência e negociar com especialistas. Santos (2007) estabelece que as habilidades de *i)* a

v) estão correlacionadas com o desenvolvimento de habilidades referentes à AC. Já as de v) a x) estão voltadas a aplicação dos conhecimentos na prática, ou seja, LC.

Santos (2007) estabelece que as expressões AC e LC possuam significados diferentes, sendo que LC ultrapassa os limites do domínio da linguagem científica, alegando que esta define o significado e finalidade da existência da AC. Além disso, o LC possui uma função social das ciências e tecnologias, uma vez que LC está diretamente ligada a aspectos sociais e ambientais e que estes influenciam as ciências, as tecnologias e a sociedade.

Sasseron e Carvalho (2011) consideram que o ensino de ciências precisa estar fundamentado na construção de conhecimentos que possam resolver problemas de natureza prática que tragam benefícios tanto ao indivíduo e a sociedade, quanto ao ambiente por meio da AC e do LC.

Para Teixeira (2013), as expressões AC e LC são apenas variações de vocábulos para se referir ao ensino de ciências na educação básica, não apresentando diferenças entre si, tanto em sentidos quanto em especificidades, uma vez que o ensino de ciências já presume a AC e o LC.

Freire (2015) relaciona a AC ao processo de emancipação das classes dominadas. Segundo esse autor, o indivíduo alfabetizado precisa ser capaz tanto de conhecer e dominar a linguagem no sentido explícito e implícito dentro de seu contexto social. Diante dos diferentes conceitos e definições apresentados por diferentes pesquisadores, podemos concluir que a AC está relacionada à capacidade que um indivíduo possui de entender palavras e conceitos técnico-científicos provenientes das diferentes áreas do conhecimento; enquanto o LC parte da capacidade adquirida com a AC e contextualiza por meio da prática social.

3.2 O ensino de física durante o período de pandemia do COVID-19

Bordin e colaboradores (2020) propuseram a inserção de atividades fundamentadas em vídeoanálise por meio do uso do software Tracker, com o intuito de estruturar oficinas de aprendizagem em relação ao conteúdo de mecânica da física. Os autores concluíram que o Tracker, um Recurso Educacional Aberto (REA) e de livre acesso e utilização, apresentou boa aceitação pelos estudantes e contribuiu tanto para o processo de ensino aprendizagem em física, quanto possibilitou ao aluno se tornar sujeito ativo no processo de aprendizagem.

Braga, Gonçalves e Lameu (2021) avaliaram uma Tecnologia Digital de Informação e Comunicação (TDICs) em espaços virtuais. Neste contexto, os autores empregaram o Peer Instruction (PI) como metodologia ativa em relação a dinamizar o processo de aprendizagem no ensino de física em relação ao conteúdo de resistores elétricos. Os resultados possibilitaram uma análise quanti-qualitativa em um estudo de caso que demonstrou um processo de aprendizagem mais eficaz em relação aos conceitos físicos do tema em estudo.

Freitas, Cabral e Junior (2021) elaboraram uma estratégia de ensino, com o intuito de envolver e proporcionar um processo de aprendizagem significativa para alunos do primeiro ano do ensino médio na disciplina de mecânica, utilizando um sistema de simulação computacional denominado de applet “Forças e Movimento”. Os autores concluíram que o uso do software possibilitou aos alunos um aprendizado mais significativo, visto que os próprios estudantes realizaram a manipulação e puderam tirar suas próprias conclusões em relação ao tema estudado.

Garcia e Soltan (2021) promoveram uma metodologia ativa em relação ao ensino de radiação solar a partir de atividades realizadas de forma remota. Os autores concluíram, a partir de relato dos próprios estudantes, que a experiência desenvolvida apresentou bom êxito em relação à promoção do aluno a sujeito ativo de sua própria aprendizagem e atuação como cidadão capaz de questionar.

Gonçalves e Denardin (2021) elaboraram uma sequência de jogos educacionais em aulas de física, utilizando o MS Power Point® a partir de animes e histórias em quadrinhos. Para tanto, elaborou-se uma diversidade de versões digitais, tais como: cruzadinhas, stop, memória, ludo e batalha naval que abordaram inúmeras temáticas da física (termologia, ondulatória, cinemática e eletrodinâmica). Os pesquisadores verificaram, por meio de questionário, que o uso do lúdico promoveu a atenção e pré-disposição dos alunos a buscar a compreensão das unidades temáticas, visto que possibilitou um maior dinamismo em relação ao processo de aprendizagem.

Sande, Sande e Carvalho (2021) investigaram a utilização de recursos digitais tecnológicos como ferramenta para auxiliar no processo de ensino-aprendizagem de física durante a pandemia. Os pesquisadores utilizaram o jogo de Nivelamento Online (NiO) que se constituía em um *quiz* de Física com ênfase em uma viagem espacial com diversos elementos de game design, com vistas a promover o engajamento dos alunos. Os resultados apontaram que houve bons resultados em relação ao processo de aprendizagem dos alunos em comparação as atividades disponibilizadas no Moodle.

Frente aos inúmeros estudos apresentados, verificou-se que nestes e em outros estudos realizados durante o período de pandemia do COVID-19. Em geral, constatou-se que mesmo diante das inúmeras metodologias ativas e ferramentas digitais que proporcionaram uma aprendizagem mais significativa no ensino de física. Entretanto, relatou-se uma enorme dificuldade dos estudantes em relação aos conceitos de notação científica e unidades de medidas utilizadas nas diferentes áreas da física abordada no ensino médio. Logo, existe uma necessidade de se implementar projetos de intervenção pedagógica, a fim de minimizar as dificuldades geradas ao longo dos dois anos de pandemia que resultaram em um déficit de aprendizagem superior ao registrado em trabalhos publicados em períodos anterior a pandemia.

4 | PERCURSO METODOLÓGICO

A coleta de dados será realizada por intermédio da aplicação de uma avaliação diagnóstica contendo vinte perguntas. Em função do retorno das aulas presenciais, a avaliação a ser aplicada de forma impressa. O público-alvo serão alunos do 1º ao 3º ano do ensino médio de escolas públicas da rede estadual localizadas no município de Uberlândia, no estado de Minas Gerais. As escolas a serem selecionadas levarão em consideração a localização geográfica no município, sendo: *i)* duas escolas localizadas nos distritos de Uberlândia (Tapuirama, Cruzeiro dos Peixotos, Martinésia e Miraporanga); *ii)* duas escolas em regiões que se encontram em fase de transição para bairros (Tenda dos Morenos, Morada Nova e Marileuza); *iii)* duas escolas presentes em regiões periféricas da cidade; *iv)* duas escolas em regiões de classe média e; *v)* duas escolas em bairros centralizados, totalizando dez instituições de ensino. O questionário a ser aplicado garantirá os seguintes aspectos: *i)* confidencialidade das respostas; *ii)* o anonimato da identificação do aluno; *iii)* ausência de perguntas que atentem contra crenças religiosas, opinião política, questões pessoais ou de ordem privada entre outros. Após o período de aplicação da avaliação diagnóstica, as informações serão submetidas a um processo de quantificação e análise que será expresso em termos percentuais e apresentado de forma gráfica. A primeira parte da avaliação é constituída de perguntas qualitativas que não ensejam a abordagem de certo ou errado e outras que apresentam mais de uma alternativa. Já a segunda parte é constituída de perguntas objetivas que ensejam à marcação de uma alternativa correta, na qual é constituída de perguntas que abordam a notação científica e unidades de medida que é indispensável como pré-requisito para melhor entendimento das ciências físicas estudada no ensino médio.

5 | RECURSOS E INFRAESTRUTURA NECESSÁRIAS

A avaliação diagnóstica será aplicada em data e horário definido pelo professor de física de cada escola. Para tanto, a escola irá providenciar a impressão das avaliações, sendo o único gasto a ser dispensado por parte da escola.

6 | CRONOGRAMA DE ATIVIDADES

Este PIP será desenvolvido em várias etapas distintas, conforme o cronograma apresentado na Tabela 1.

ATIVIDADES	Ano de 202__			
	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.-Dez.
1 – Revisão e adequação do PIP a realidade institucional.	X			
2 – Elaboração, revisão e aplicação da avaliação diagnóstica.	X			
3 – Correção, análise e tratamento dos dados obtidos da avaliação.		X		
4 – Apresentação do relatório de desempenho de cada série e turma da escola e o apontamento de possíveis estratégias de recursos didáticos a serem adotados de acordo com os resultados obtidos, que atenda as particularidades e realidade de cada escola.		X	X	
5 – Realização de atividades de intervenção pedagógica (IP) paralela as atividades estabelecidas no planejamento de ensino da disciplina de Física, de acordo com o relatório gerado pela avaliação diagnóstica.				X

Tabela 1: cronograma de atividades para execução do PIP

Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

7 | RESULTADOS ESPERADOS

A avaliação diagnóstica pretende mensurar o nível de conhecimento que o aluno possui em trabalhar com ordens de grandeza, notação científica e unidades de medida que são pré-requisitos para o melhor entendimento da disciplina de física no ensino médio. Entre os resultados esperados estão: *i*) geração de um relatório com o diagnóstico de cada série; *ii*) estimular e incentivar a continuidade deste PIP sempre que se fizer necessário avaliar conhecimento que são pré-requisitos para o melhor entendimento das ciências físicas e; *iii*) geração de informações que possa colaborar para a revisão do processo de ensino-aprendizagem presente no Projeto Político Pedagógico (PPP) da escola.

A partir dos resultados obtidos por intermédio deste PIP, será possível diagnosticar os diferentes níveis de conhecimento que os alunos apresentam ao retornarem ao sistema de ensino presencial após período pandêmico que afetou diretamente o aluno em seu processo de aprendizagem tanto em termos de déficits, quanto em nível de conhecimento adequado em relação às habilidades e competências presentes na BNCC e no PPP da escola. Que este PIP possa ser um modelo a ser melhorado e aplicado em outras áreas do conhecimento científico, auxiliando na diferenciação do conhecimento científico e o de senso comum, possibilitando a consolidação de conceitos fundamentais para melhor desenvolvimento e aprendizado do conhecimento técnico - científico na área de física e suas interfaces com outras ciências. Além disso, este PIP poderá ser utilizado como ponto de partida para reestruturar os planos de ensino e nortear os diferentes projetos de intervenção pedagógica para a construção de um processo de ensino-aprendizagem mais adequado as necessidades dos alunos, sendo um interlocutor entre as necessidades da comunidade e a capacidade da escola de se adequar a realidade do contexto no qual se

encontra inserida.

8 | SUGESTÕES A SEREM IMPLEMENTADAS APÓS OS DADOS OBTIDOS PELA AVALIAÇÃO DIAGNÓSTICA

O sistema formal de avaliação considera apto e alfabetizado cientificamente, mas que no exercício do cotidiano e das exigências da sociedade, se apresentam incapazes de interpretar e expressar uma opinião frente a um texto, noticiário e percepção da realidade na qual se insere enquanto indivíduo, mas que fica a mercê na condição de cidadão capaz de exercer seus deveres e lutar pelos seus direitos ou de outrem. Logo, se faz necessário e urgente elaborar e/ou aplicar estratégias de ensino não só para o componente curricular de ensino de física, mas para as demais áreas com o intuito de desenvolver no aluno a ideia de que o mesmo é capaz de se tornar um sujeito ativo de forma a interagir e se posicionar enquanto cidadão. Para isso é urgente a implementação de estratégias de ensino, entre as quais: *i)* atividades lúdicas; *ii)* gincanas; *iii)* projetos de leitura; *iv)* temáticas socioambientais; *v)* tarefas-provas; *vi)* entrevistas; *vii)* atividades de campo e visitas técnicas; *viii)* fotografias entre outras de acordo com a necessidade para o componente curricular de física (AGUIAR; MOURA; BARROSO, 2022; BORDIN et al., 2020; CATARINO; REIS, 2021; FÁVARO et al., 2020).

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, C. E.; MOURA, M.; BARROSO, M. F. Ensino de física em tempos de pandemia: Instrução remota e desempenho acadêmico. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 44, p.1-4, 2022. <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2021-0329>
- AMARAL, L. Z.; ROSA, C. T. W.; LOCATELLI, A. Educação em ciências/química e a alfabetização científica na perspectiva da formação cidadã: características e tendências das pesquisas nacionais. **Revista REAMEC**, v. 7, n.3, p. 297-324, 2019.
- ARRUDA, H. F. G.; TEIXEIRA, R. R. P. Ensino de Física e escalas de distâncias astronômicas. **Revista de Ensino de Ciências e Matemática**, v. 13, n.2, p. 1-22, 2022. <https://dx.doi.org/10.26843/rencima.v13n2a02>
- BELLEMAIN, P. M. B.; BIBIANO, M. F. A.; SOUZA, C. F. Estudar grandezas e medidas na educação básica. **Revista de Educação Matemática e Tecnológica Iberoamericana**, p. 1-16, 2020.
- BORDIN, G. D. et al. Desafios dos professores durante o distanciamento social devido à pandemia da COVID-19: uma proposta para o ensino de física utilizando videoanálise. **Revista Tecnologia e Sociedade**, v. 16, n. 43, p. 147-157, 2020. <https://periodicos.utfpr.edu.br/rts/article/view/12186>
- BRAGA, C. R.; GONÇALVES, R. S.; LAMEU, L. P. Peer Instruction em aulas remotas no ensino de física no período da pandemia da COVID-19. **Caminhos da educação matemática em revista**, v. 11, n. 4, p. 1-23, 2021.

CATARINO, G. F. C.; REIS, J. C. O. A pesquisa em ensino de ciências e a educação científica em tempos de pandemia: reflexões sobre natureza da ciência e interdisciplinaridade. **Ciência & Educação**, v. 27, p.1-16, 2021. <https://doi.org/10.1590/1516-731320210033>

CUNHA, R. B. Alfabetização científica ou letramento científico?: interesses envolvidos nas interpretações da noção de scientific literacy. **Revista Brasileira de Educação**, v. 22 n. 68, p. 168-189, 2017. <https://dx.doi.org/10.1590/S1413-24782017226809>

FÁVARO, V. H. A. et al. Alfabetização científica no ensino de física: uma proposta através do PIBID. **Revista Mundi Sociais e Humanidades**, v.5, n.1, p. 1-15, 2020.

FERNANDES-SOBRINHO, M. Ciência-Tecnologia-Sociedade em livros de física no Brasil: critérios de avaliação para o Programa Nacional do Livro Didático. **Revista Contribuciones a las Ciencias Sociales**, p. 1-11, 2020. <https://www.eumed.net/rev/cccss/2020/09/livros-fisica-brasil.html>

FREITAS, T. B.; CABRAL, S. C.; JUNIOR, S. A. B. Ensino de física em tempos de pandemia: a utilização do applet “forças e movimento”, da plataforma phet interactive simulation, como ferramenta metodológica. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 15, p.1-9, 2021. <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v10i15.22796>

FREIRE, P. **Pedagogia da autonomia: saberes necessários à prática educativa**. 5. ed. Rio de Janeiro: Paz e Terra, 2015, 144 p. ISBN 85775331635

GARCIA, B. F.; SOLTAU, S. B. Física solar: uma experiência de ensino remoto durante a pandemia. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 3, p. 1-12, 2021. <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v10i3.13495>

GOMES, V.; SANTOS, A. C. Perspectivas da alfabetização e letramento científico no Brasil: levantamento bibliométrico e opinião de profissionais da educação do ensino fundamental I. **Scientia Plena**, v.14, n. 5, p. 1-18, 2018. <http://dx.doi.org/10.14808/sci.plena.2018.052701>

GONÇALVES, T. A.; DENARDIN, L. Elaboração de jogos educacionais: estratégias no ensino de física durante a pandemia de COVID-19. **Revista de Enseñanza de La Física**, v. 33, n. 2, p.17-25, 2021.

JESUS, G. J. R. et al. A utilização das tecnologias da informação e comunicação como interface para o ensino de conteúdos de física. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 6, p.1-8, 2022. <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i6.28832>

JUST, M. C.; NECKE, L. Popularização científica e tecnológica: experimentos de física itinerantes no ambiente escolar. **Revista de Extensão da UNESC**, v. 5, n. 1, p. 1-11, 2020.

KRAUSE, M. O'D.; SANTOS, T. S. J. Diferenciar, individualizar e personalizar o ensino para melhorar os indicadores de aprendizagem com um laboratório virtual de física. **Conjecturas**, v. 22, n.1, p. 1440-1451, 2022. <https://doi.org/10.53660/CONJ-577-210>

LORENZETTI, L.; DELIZOICOV, D. Alfabetização científica no contexto das séries iniciais. Ensaio: Belo Horizonte: **Pesquisa em Educação em Ciências**, v. 3, p. 37-50, 2001.

MACHADO, C. B. H.; MARCELINO, V. S. Uma proposta didática para aulas remotas: microaprendizagem no ensino de física. **Revista Brasileira do Ensino Médio**, v.3, p. 187-202, 2020. [https:// dx.doi.org/10.5281/zenodo.4300662](https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.4300662)

MACHADO, M. M.; SILVA, G. M.; FONTELLA, L. G. Letramento científico e percepções populares: uma análise sobre conhecimentos de Ciência e pseudociência. **Ciência e Natura**, v. 43, n.92, p. 1-31, 2021. <https://doi.org/10.5902/2179460X63306>

MORAES, P. F.; OLIVEIRA, A. F. Impactos na aprendizagem e percepções dos alunos sobre as aulas experimentais no contexto do ensino remoto. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 6, p.1-9, 2022. <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i6.29087>

NAVARRO, E. A.; ARGUEDAS-MATARRITA, C. El trabajo experimental en la enseñanza de la Física en tiempos de pandemia mediante el uso de la aplicación II Ley de Newton en la UNED de Costa Rica. **Revista Innovaciones Educativas**, v.22,p.103-114, 2020. <https://doi.org/10.22458/ie.v22iespecial.3204>

PAULA, H. F. et al. Engajamento de estudantes em um ensino remoto e emergencial de física. **Ensaio - Pesquisa em Educação e Ciências**, v. 23, p. 1-18, 2021. <http://dx.doi.org/10.1590/1983-21172021230117>

QUADROS, R. L.; VILLAS-BOAS, V. Aprendizagem Ativa no Ensino Médio: Uma Proposta para o Ensino de Grandezas Físicas e Unidades de Medida Utilizando Casos de Ensino. **Scientia Cum Industria**, v. 8, n.3, p. 17-21, 2020. <http://dx.doi.org/10.18226/23185279.v8iss3p17>

RAMOS, F. P. et al. Alfabetização científica e as visões deformadas no ensino de ciências: algumas reflexões sobre os discursos de professores de física. **Revista de Ensino de Ciências e Matemática**, v. 11, n. 3, p. 1-15, 2020. <http://dx.doi.org/1026843/rencima>

SANDE, D.; SANDE, D.; CARVALHO, A. A. Aprendizagem de Física e engajamento através do jogo Nivelamento Online durante a pandemia da COVID-19. **Revista Novas Tecnologias na Educação**, v. 19, v.2, p. 61-70, 2021. <https://doi.org/10.22456/1679-1916.121187>

SANTOS, T. S.; SOUSA, M. F. L. Alfabetização científica, enfoque CTSA e questões sociocientíficas no ensino de ecologia: saberes e práticas de docentes da rede municipal de Lagarto – SE. **Revista de Ensino de Ciências e Matemática**, v. 11, n. 3, p. 16-36, 2020. <http://dx.doi.org/10.26843/rencim>

SANTOS, W. L. P. Educação científica na perspectiva de letramento como prática social: funções, princípios e desafios. **Revista Brasileira de Educação**, v. 12, n. 36, p. 474-550, 2007. <http://www.scielo.br/rbedu/v12n36/a07v1236.pdf>

SASSERON, L. H.; CARVALHO, A. M. P. Alfabetização Científica: uma revisão bibliográfica. **Investigações em Ensino de Ciências**, v.16, p.59-77, 2011.

TAVARES, A.; SILVA, A.; CHESMAN, S. Experimentos Portáteis para a Aprendizagem das Leis da Óptica Geométrica com Metodologia ISLE. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 44, p.1-7, 2022. <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2022-0084>

TEIXEIRA, F. M. Alfabetização científica: questões para reflexão. Bauru: **Ciência & Educação**, v. 19, n. 4, p. 795-809, 2013.

TUPAN, L. F. S. et al. Perspectivas de professores de Física mediante o ensino remoto durante a pandemia de COVID-19. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 11, p. 1-13, 2021. <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v10i11.19293>

VILELA, J. L. L.; FERRAZ, A. C.; ARAÚJO, M. S. T. Utilização de recursos tecnológicos nas aulas de física como forma de superar as dificuldades impostas pela pandemia da COVID-19. **Rede Amazônica de Educação em Ciências e Matemática**, v. 9, n. 2, p.1-27, 2021. <http://dx.doi.org/10.26571/reamec.v9i2.11470>

SOBRE A ORGANIZADORA

GLÉCILLA COLOMBELLI DE SOUZA NUNES - Sou graduada em Física (habilitação licenciatura) com mestrado e doutorado pela Universidade Estadual de Maringá (UEM). Durante a graduação participei como aluna bolsista do Programa Institucional de Bolsa de Iniciação à Docência (PIBID) e atuei como monitora no Museu Dinâmico Interdisciplinar (MUDI) localizado na UEM (campus Maringá). Ambos, mestrado e doutorado, foram na área de Física da Matéria Condensada com ênfase em materiais magnéticos, sendo as principais técnicas empregadas para as análises: refinamento Rietveld e espectroscopia Mössbauer. Em 2017 realizei um estágio de 6 meses no Institut Néel (Grenoble - Fr) realizando medidas de magnetização de amostra vibrante e medidas de temperatura de Curie. Concomitantemente com o doutorado, realizei uma especialização pela UNINTER em Metodologia do Ensino na Educação Superior. Em 2022 me graduei em Matemática (habilitação licenciatura) pela UNIASSELVI e também fiz uma especialização em Educação Especial em que desenvolvi um trabalho sobre a importância da motivação escolar em alunos com TDAH. Atualmente, trabalho como técnica de laboratório da COMCAP / UEM, em que realizo análises nos seguintes equipamentos: reômetro, citômetro de fluxo, criostato, dicroísmo circular e analisador dinâmico de luz (DLS). Além disso, atuo como professora conteudista para diversas instituições de ensino particular.

ÍNDICE REMISSIVO

A

Anisotropia 12
Aquisição de imagens 2
Artificial pinning centers 26, 32, 33
Atmosfera terrestre 35
Avaliação diagnóstica 48, 49, 51, 52, 55, 56, 57

B

BAC 1, 2, 3, 4, 5, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24
Biomagnetismo 12, 23
Biosusceptometria de corrente alternada 1, 2, 11, 13, 14, 24
Box-Plot 35, 40, 41, 42, 43

C

Ciências da natureza 49
Comprimido magnético 12, 15, 16, 17, 18, 19, 22, 23
COVID-19 48, 49, 50, 52, 53, 54, 57, 58, 59, 60

E

Electron-phonon interaction 30, 32
Energia solar 35, 36, 45, 46, 47
Energias renováveis 35
Ensino de física 46, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 57, 58, 59
Ensino médio 48, 50, 51, 54, 55, 56, 59
Ensino remoto 48, 58, 59, 60

F

Ferrita de manganês 4, 15

G

Gradiômetro 3, 4, 12

I

Imagens magnéticas 11, 12, 13, 22
Imagens quantitativas 12, 23, 24
Índice de claridade 35, 36, 39, 43, 44, 45
Instrumentação biomédica 1

Irradiância 35, 38, 39, 40, 42, 43, 44

Irradiância difusa horizontal 38

Irradiância direta horizontal 38

Irradiância global horizontal 38

M

Magnetorresistores 11, 12, 13, 15, 24

Marcadores magnéticos 15, 23

Material magnético 9, 10, 14, 19, 22, 23

Metodologias ativas 48, 49, 54

Micropartículas 15

MnFe₂O₄ 4, 15

N

Nanomedicina 2

Nanopartículas magnéticas 1, 2, 3, 4, 10, 13, 24, 25

Nb₃Sn(s) 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33

Notação científica 48, 51, 55

P

PIT process 28

R

Radiação solar 35, 36, 39, 47, 54

S

Sistemas magnéticos 1, 2

Superconducting properties 26, 30, 32

Superconducting wires 28, 34

Superconductive behavior 27

T

Técnicas biomagnéticas 12

U

Unidades de medidas 48, 50, 51, 54



Física:

Produção de conhecimento
relevante e qualificado 3

 www.atenaeditora.com.br
 contato@atenaeditora.com.br
 @atenaeditora
 www.facebook.com/atenaeditora.com.br

Física:

Produção de conhecimento
relevante e qualificado 3

 www.atenaeditora.com.br
 contato@atenaeditora.com.br
 @atenaeditora
 www.facebook.com/atenaeditora.com.br