

ORGANIZADORAS
Profa. Dra Andréa Jane da Silva
Profa. Dra Lília Basílio de Caland



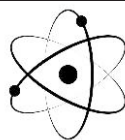
Compartilhando conhecimento

ORGANIZADORAS
Profa. Dra Andréa Jane da Silva
Profa. Dra Lília Basílio de Caland



Compartilhando conhecimento

RELATOS DE PESQUISA EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA



Editor Chefe

Dr. Washington Moreira Cavalcanti

Organizadoras

Profa. Dra Andréa Jane da Silva

Profa. Dra Lília Basílio de Caland

ISBN: 978-65-88890-61-5

DOI: <https://doi.org/10.63951/synapse978-65-88890-61-5>

Conselho Editorial

Dr. Washington Moreira Cavalcanti

Dra. Lais Brito Cangussu

Dr. Jean Andrade Canestri

Dr. Rômulo Maziero

Ms. Jorge Luiz dos Santos Mariano

Dra. Daniela Aparecida de Faria

Ms. Paulo Henrique Nogueira da Fonseca

Ms. Edgard Gonçalves da Costa

Ms. Gilmara Elke Dutra Dias

Dra. Leonete Cristina de A. F. M. Silva

Dra. Edna Lucia da Rocha Linhares

Dr. Adilson Tadeu Basquerote Silva

Projeto Gráfico e Diagramação

Departamento de arte Synapse Editora

Editoria de Arte

Maria Aparecida Fernandes

Revisão

Os Autores

2025 by Synapse Editora

Copyright © Synapse Editora

Copyright do Texto © 2025 Os autores

Copyright da Edição © 2025 Synapse Editora

Direitos para esta edição cedidos à

Synapse Editora pelos autores.

Todo o texto bem como seus elementos, metodologia, dados apurados e a correção são de inteira responsabilidade dos autores. Estes textos não representam de forma alusiva ou efetiva a posição oficial da Synapse Editora.

A Synapse Editora não se responsabiliza por eventuais mudanças ocorridas nos endereços convencionais ou eletrônicos citados nesta obra.

Os livros editados pela Synapse Editora, por serem de acesso livre, *Open Access*, é autorizado o download da obra, bem como o seu compartilhamento, respeitando que sejam referenciados os créditos autorais. Não é permitido que a obra seja alterada de nenhuma forma ou usada para fins comerciais.

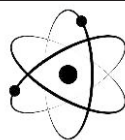
O Conselho Editorial e pareceristas convidados analisaram previamente todos os manuscritos que foram submetidos à avaliação pelos autores, tendo sido aprovados para a publicação.



Compartilhando conhecimento

2025

RELATOS DE PESQUISA EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA



S586r Silva, Andréa Jane da

Relatos de pesquisa em ciência e tecnologia
Organizadoras: Andréa Jane da Silva, Lília Basílio de Caland
Belo Horizonte, MG: Synapse Editora, 2025, 227 p.

Formato: PDF
Modo de acesso: World Wide Web
Inclui bibliografia

ISBN: 978-65-88890-61-5
DOI: <https://doi.org/10.63951/synapse978-65-88890-61-5>

1. Pesquisa em ciência e tecnologia, 2. Ciência, 3. Tecnologia,
4. Pesquisas acadêmicas, 5. Relatos.

I. Relatos de pesquisa em ciência e tecnologia
II. Andréa Jane da Silva, Lília Basílio de Caland

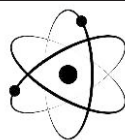
CDD: 600 - 670
CDU: 60 - 62.4

SYNAPSE EDITORA

Belo Horizonte – Minas Gerais
CNPJ: 40.688.274/0001-30
Tel: + 55 31 98264-1586
www.editorasynapse.org
editorasynapse@gmail.com



Compartilhando conhecimento
2025



APRESENTAÇÃO

Esta coletânea reúne artigos advindos das pesquisas realizadas por estudantes do Bacharelado de Ciência e Tecnologia da Universidade do Estado do Rio Grande do Norte orientadas pelos docentes do curso e alguns colaboradores externos e internos à instituição. Todos esses estudos foram parte do Trabalho de Conclusão de Curso para obtenção do título de bacharelado. Configuram, assim, estudos dos concluintes da primeira turma, ingressante em 2013 e com trabalho concluído em 2015, e da última turma até a data desta organização, concluinte em 2025.

Nesta obra, os leitores poderão se debruçar sobre as temáticas, objetos de estudo e problemáticas que têm sido recorrentemente estudados na área de Ciência e Tecnologia, conforme descrevemos a seguir.

O estudo intitulado “Liberação de paredes de domínio por corrente de spin polarizada” foi realizado pela egressa Daiane Cristine Dos Santos Souza sob a orientação principal da docente Ana Lúcia Dantas, além da contribuição dos professores Arthur da Silva Carriço (Professor titular da UFRN) e Andréa Jane da Silva. Nesta pesquisa, busca-se estudar numericamente a formação de paredes de domínio e analisar os efeitos da transferência de torque de corrente polarizada de spin sobre a magnetização de sistemas nanoestruturados. Foram realizadas simulações computacionais por meio das quais se observou que a formação de paredes de domínio depende dos parâmetros geométricos da nanofita, como a espessura, e também da intensidade do campo de interface.

No trabalho realizado pelo egresso Pedro Vitor Henrique Faustino, intitulado “Dinâmica de vórtices magnéticos em nanoelementos ferromagnéticos: simulações micromagnéticas”, sob a orientação da Professora Ana Lúcia Dantas, co-orientação de Thaisa Grasielly de Moraes Jales e colaboração do professor Arthur da Silva Carriço, o objeto do estudo é a formação e excitações de vórtices em nanoelementos retangulares de ferro e o foco está em responder a seguinte questão: como os fatores geométricos e magnéticos podem alterar as

RELATOS DE PESQUISA EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA

frequências de ressonância de um vórtice isolado? O estudo concluiu que os nanoelementos de Fe apresentam frequências de ressonância mais altas, enquanto o Py exibiu respostas em frequências mais baixas, revelando como as propriedades magnéticas de cada material são distintas.

Outra produção aqui inserida é da Egressa Janiele Andrade Borges, da primeira turma concluinte, 2015, intitulada “Potencial de captação e aproveitamento da água pluvial para uso não potável em edificações na cidade de Natal/RN, sob a orientação da Professora Maria Helena de Freitas. Trata-se de um estudo bibliográfico de caráter exploratório que teve como objetivo analisar indicadores relacionados ao potencial e às técnicas de captação e aproveitamento da água pluvial para fins não potáveis na cidade de Natal. Os resultados, no ano de 2015, evidenciam que, em Natal, alguns reservatórios encontravam-se próximos do limite de utilização, somando-se ao problema da contaminação por nitrato em águas subterrâneas. Esse cenário reforçava a necessidade de alternativas sustentáveis, entre as quais se destaca o aproveitamento da água pluvial.

O trabalho da egressa Yslane Stephanie Macêdo Dos Santos, orientado pelo professor Leonardo Linhares Oliveira, tem como título “Produto Energético Máximo De Nanopartículas Magnéticas Do Tipo Nucleo@Casca Com Geometria Cilíndrica”. Trata-se de um estudo que tem como objetivo analisar a combinação de diferentes materiais magnéticos em nanopartículas núcleo-casca cilíndricas, visando aumentar o produto energético e reduzir o uso de terras-raras. Por meio de simulações, a pesquisa concluiu que nanopartículas bi-magnéticas do tipo núcleo@casca, especialmente em geometria cilíndrica, configuram-se como alternativas promissoras para a produção de ímãs permanentes nanoestruturados. Verificou-se que essas estruturas apresentam um (BH)max otimizado quando o núcleo apresenta dimensões reduzidas e a espessura da casca encontra-se em um ponto de equilíbrio ideal.

A pesquisa das egressas Tanara Caroline Nunes Nicácio e Thalita Queiroz e Silva foi orientada pela professora Lília Basílio De Caland com a colaboração de Argeu Cavalcante Fernandes e Euzébio Guimarães Barbosa, ambos vinculados à Universidade Federal do Rio Grande do Norte. O objetivo principal deste trabalho foi analisar os parâmetros de qualidade do biodiesel obtido por meio da reação de transesterificação via rota metílica e etílica, empregando o óleo de algodão comercializado. Os resultados mostraram que o óleo de algodão

RELATOS DE PESQUISA EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA

comercializado analisado é uma matéria-prima viável para produção de biodiesel, pois os resultados apresentaram parâmetros de qualidade que atendem às normas técnicas exigidas.

Em “Dimensionamento de sistemas de geração de energia elétrica solar e eólica para residências”, o egresso Filipe Ferreira orientado pelo Professor Brismark Goes da Rocha com a colaboração de Braulio Batista Soares buscou em seu estudo identificar a fonte mais apropriada entre sistemas on-grid solares e eólicos para uso residencial, por meio da avaliação dos recursos energéticos, do dimensionamento da quantidade de módulos fotovoltaicos e de aerogeradores necessários, a fim de avaliar a eficiência prática para diferentes perfis de consumo. A análise se deu tomando os dados de três residências reais com consumos distintos. Conclui-se que a energia solar se mostra mais viável para residências, pois ocupa menor área e requer menor quantidade de equipamentos em comparação ao sistema eólico.

A pesquisa de Luiz Felipe de Souza Silva foi orientada pelo professor Leonardo Linhares Oliveira com a colaboração dos professores Ana Lúcia Dantas, Marcos Santos Nunes e Artur da Silva Carriço. Por meio de simulações computacionais, o trabalho investigou estruturas núcleo@casca nas configurações duro@macio e macio@duro com formato esférico, utilizando combinações dos materiais CoPt, NdFeB, Fe e CoFe₂. O propósito foi correlacionar o desempenho do produto energético com variáveis estruturais do sistema, como o diâmetro do núcleo, a espessura da camada externa e os tipos de materiais empregados. Os resultados demonstram que nanopartículas do tipo núcleo-casca apresentam diferentes respostas magnéticas e podem atingir um aumento expressivo no produto energético em determinadas condições geométricas.

Arthur Ferreira de Araújo sob a orientação do professor Brismark Góes da Rocha com a colaboração do discente Danilo Henrique Carvalho realizou um estudo de caso com um automóvel da marca Ford, modelo Ka 16, com motor de três cilindros, que utilizou uma mistura de hidrogênio e gasolina, a fim de avaliar o impacto no consumo de gasolina em diferentes níveis de amperagem (0,2; 0,3; 0,4; 0,5 e 1,0). Os ensaios indicaram que não houve variações relevantes nos resultados até à corrente de 1,0 A. No entanto, após a substituição da solução eletrolítica por hidróxido a 44 g/L, a condutividade elétrica aumentou de 18,80 mS/cm³ para 149,5 mS/cm³, o que resultou num acréscimo de 11,62% na média de quilometragem. Num determinado cenário de consumo, o desempenho alcançou os 16,11 km/L, superando as médias urbanas habituais, que variam entre os 9 km/L e os 12 km/L.

RELATOS DE PESQUISA EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Joelma Gleciene G. do N. Andrade, Ellen Gomes Silva e Natália Sabrina Nunes Silveira sob a orientação da professora Lília Basílio de Caland e a colaboração da professora Maria de Fátima Vitória de Moura e de Thalita Queiroz e Silva realizaram um estudo para avaliar a qualidade da farinha de carne e ossos (FCO) produzida pela empresa Indama. Foram analisados parâmetros físico-químicos como umidade, acidez, lipídios, índice de saponificação, proteína bruta e composição mineral (Ca, P, Fe, Na e K), comparando os resultados com os de uma ração comercial. Os dados indicaram que a FCO atende aos padrões da legislação brasileira e apresenta composição adequada para uso em rações avícolas, configurando-se como uma alternativa sustentável, nutritiva e economicamente vantajosa.

O trabalho intitulado “Análise do comportamento das células fotovoltaicas com relação à temperatura” de Jônatas Teixeira Carneiro sob a orientação do professor Brismark Góes da Rocha com a colaboração de Bruno Cruz de Oliveira e do discente Arthur Ferreira de Araujo teve como objeto o comportamento térmico do módulo fotovoltaico. Para dar conta desse objeto, analisou um módulo fotovoltaico de silício monocristalino com 36 células, em que foi observada a relação entre a temperatura da superfície das células fotovoltaicas e a direção do painel. As análises estatísticas, como regressão linear múltipla e o teste T-Student, mostraram que a temperatura das células varia de acordo com a posição do módulo. O modelo que melhor se ajustou indicou que a temperatura média do módulo fotovoltaico é influenciada principalmente pela temperatura da moldura da placa.

Em “Análise dos campos magnéticos gerados por nanoelementos com geometria cilíndrica”, a egressa Ravena Yáskara Sampaio de Oliveira Tavares sob a orientação de Leonardo Linhares Oliveira realiza uma descrição teórica do campo magnético gerado por nanoestruturas de diferentes geometrias compostas por Fe_3O_4 , SmCo_5 e $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$, utilizando um algoritmo numérico baseado no método de campo efetivo local autoconsistente. A análise resultou em gráficos que mostram os perfis de campo e as curvas de magnetização. Observou-se que certas configurações geométricas e propriedades intrínsecas dos materiais favorecem maior uniformidade na magnetização. Entre os fatores mais influentes está a magnetização de saturação: materiais com valores elevados dessa propriedade apresentaram respostas mais intensas às variações dimensionais sob a aplicação de um campo externo.

RELATOS DE PESQUISA EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA

O trabalho intitulado "Uso da Transformada de Fourier na Busca de Indícios de Trânsito de Exoplaneta em Curva de Luz de Estrelas", de autoria da egressa Natane Martiniano dos Santos sob a orientação do professor Bráulio Batista Soares", analisa oscilações periódicas no fluxo luminoso de estrelas mediante a aplicação da Transformada de Fourier. A metodologia, implementada no ambiente RStudio com dados da NASA, transpusera informações do domínio temporal para o frequencial a fim de deduzir intervalos orbitais em quatro sistemas – dois com exoplanetas confirmados e dois candidatos. Os resultados obtidos pelos autores coincidiram com valores de referência para metade dos casos, divergindo nos demais em função de abordagens distintas. Conclui-se que o procedimento demonstra eficácia como instrumento complementar para a detecção indireta de planetas extrassolares, reafirmando sua pertinência em estudos astrofísicos.

O estudo de Maria Eduarda De Oliveira Cruz, Thalita Queiroz e Silva e Eva Lúcia Cardoso Silveira sob a orientação da docente Lília Basílio de Caland teve como propósito desenvolver materiais e procedimentos para a purificação do sebo bovino utilizando adsorventes de baixo custo, como areia de praia e cascas de abacaxi, além de adsorventes naturais e sintéticos, incluindo óxido de pó de concha e casca de ovo calcinados, óxido de cálcio comercial e sílica gel. Os resultados demonstraram que os adsorventes, tanto naturais quanto sintéticos, foram eficientes na eliminação de pigmentos indesejáveis, proporcionando uma redução de 85,7% na acidez. Contudo, o rendimento do biodiesel permaneceu abaixo de 80%, indicando que, apesar de a purificação ter sido eficaz na redução da acidez, não foi suficiente para assegurar uma transesterificação plenamente eficiente.

Esperamos que a leitura das pesquisas aqui inseridas possa contribuir para melhor compreensão dos possíveis cenários de investigação na área de Ciência e Tecnologia.

Boa leitura!

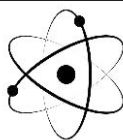
Andréa Jane da Silva

Lília Basílio de Caland



Compartilhando conhecimento

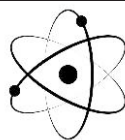
2025



SUMÁRIO

1 LIBERAÇÃO DE PAREDES DE DOMÍNIO POR CORRENTE DE SPIN POLARIZADA	12
<i>DAIANE CRISTINE DOS SANTOS SOUZA, ARTUR DA SILVA CARRIÇO, ANDRÉA JANE DA SILVA e ANA LÚCIA DANTAS</i>	
DOI: 10.63951/synapse978-65-88890-61-5_1	
2 DINÂMICA DE VÓRTICES MAGNÉTICOS EM NANOELEMENTOS FERROMAGNÉTICOS: SIMULAÇÕES MICROMAGNÉTICAS	26
<i>PEDRO VITOR HENRIQUE FAUSTINO, THAISA GRASIELLY DE MORAIS JALES, ARTUR DA SILVA CARRIÇO, ANA LÚCIA DANTAS</i>	
DOI: 10.63951/synapse978-65-88890-61-5_2	
3 POTENCIAL DE CAPTAÇÃO E APROVEITAMENTO DA ÁGUA PLUVIAL PARA USO NÃO POTÁVEL EM EDIFICAÇÕES NA CIDADE DE NATAL/RN.....	44
<i>JANIELE ANDRADE BORGES, MARIA HELENA DE FREITAS</i>	
DOI: 10.63951/synapse978-65-88890-61-5_3	
4 PRODUTO ENERGÉTICO MÁXIMO DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS DO TIPO NÚCLEO@CASCA COM GEOMETRIA CILÍNDRICA	62
<i>YSLANE STEPHANIE MACÊDO DOS SANTOS, LEONARDO LINHARES OLIVEIRA</i>	
DOI: 10.63951/synapse978-65-88890-61-5_4	
5 AVALIAÇÃO DA REAÇÃO DE TRANSESTERIFICAÇÃO DO ÓLEO DE ALGODÃO EMPREGANDO ROTA METÍLICA E ETÍLICA	80
<i>TANARA CAROLINE NUNES NICÁCIO, THALITA QUEIROZ E SILVA, ARGEU CAVALCANTE FERNANDES, EUZÉBIO GUIMARÃES BARBOSA e LÍLIA BASÍLIO DE CALAND</i>	
DOI: 10.63951/synapse978-65-88890-61-5_5	
6 DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA SOLAR E EÓLICA PARA RESIDÊNCIAS	97
<i>FILIPPE FERREIRA, BRÁULIO BATISTA SOARES e BRISMAR GÓES DA ROCHA</i>	
DOI: 10.63951/synapse978-65-88890-61-5_6	
7 ACOPLAMENTO DIPOLAR, PRODUTO ENERGÉTICO MÁXIMO E CAMPO DIPOLAR DE NANOPARTÍCULAS DO TIPO NÚCLEO@CASCA	116
<i>LUIZ FELIPE DE SOUZA SILVA, LEONARDO LINHARES OLIVEIRA, ANA LÚCIA DANTAS, MARCOS SANTOS NUNES, ARTUR DA SILVA CARRIÇO</i>	
DOI: 10.63951/synapse978-65-88890-61-5_7	

RELATOS DE PESQUISA EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA



8 ANÁLISE DO CONSUMO DE GASOLINA EM AUTOMÓVEL COM TRÊS CILINDROS NO USO DE HIDROGÊNIO COMO COMBUSTÍVEL SECUNDÁRIO 131

ARTHUR FERREIRA DE ARAÚJO, DANILO HENRIQUE DE CARVALHO e BRISMARK GÓES DA ROCHA

DOI: 10.63951/synapse978-65-88890-61-5_8

9 ANÁLISE DE PARÂMETROS DE QUALIDADE DE FARINHA DE RESÍDUOS FRIGORÍFICOS PARA USO EM DIETAS AVÍCOLAS 147

JOELMA GLECIANE G. DO N. ANDRADE, ELLEN GOMES SILVA, NATÁLIA SABRINA DE LIMA NUNES, MARIA DE FÁTIMA VITÓRIA DE MOURA, THALITA QUEIROZ E SILVA e LÍLIA BASÍLIO DE CALAND

DOI: 10.63951/synapse978-65-88890-61-5_9

10 ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DAS CÉLULAS FOTOVOLTAICAS COM RELAÇÃO À TEMPERATURA 168

JÔNATAS TEIXEIRA CARNEIRO, ARTHUR FERREIRA DE ARAÚJO, BRUNO CRUZ DE OLIVEIRA e BRISMARK GÓES DA ROCHA

DOI: 10.63951/synapse978-65-88890-61-5_10

11 ANÁLISE DOS CAMPOS MAGNÉTICOS GERADOS POR NANOELEMENTOS COM GEOMETRIA CILÍNDRICA 180

RAVENA YASKARA SAMPAIO DE OLIVEIRA TAVARES, LEONARDO LINHARES OLIVEIRA

DOI: 10.63951/synapse978-65-88890-61-5_11

12 USO DA TRANSFORMADA DE FOURIER NA BUSCA DE INDÍCIOS DE TRÂNSITO DE EXOPLANETA EM CURVA DE LUZ DE ESTRELAS 194

NATANE MARTINIANO DOS SANTOS e BRÁULIO BATISTA SOARES

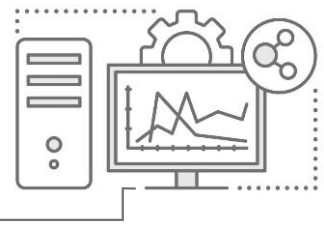
DOI: 10.63951/synapse978-65-88890-61-5_12

13 MÉTODOS DE PURIFICAÇÃO DO SEBO BOVINO PARA OBTENÇÃO DE BIODIESEL 208

MARIA EDUARDA DE OLIVEIRA CRUZ, THALITA QUEIROZ E SILVA, EVA LÚCIA CARDOSO SILVEIRA e LÍLIA BASÍLIO DE CALAND

DOI: 10.63951/synapse978-65-88890-61-5_13

SOBRE AS ORGANIZADORAS 225



CAPÍTULO 1

DOI: 10.63951/synapse978-65-88890-61-5_1

DAIANE CRISTINE DOS SANTOS SOUZA^{1,2}

ARTUR DA SILVA CARRIÇO²

ANDRÉA JANE DA SILVA¹

ANA LÚCIA DANTAS¹

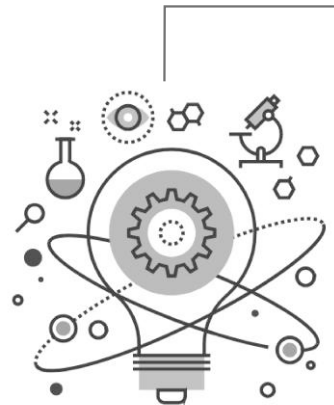
LIBERAÇÃO DE PAREDES DE DOMÍNIO POR CORRENTE DE SPIN POLARIZADA

Resumo

O aprisionamento e a liberação de paredes de domínio em fitas ferromagnéticas (FM) crescidas sobre substratos antiferromagnéticos (AFM) vicinais são fenômenos de grande relevância para o desenvolvimento de dispositivos spintrônicos de próxima geração. A vicinalidade do substrato AFM induz sequências periódicas de degraus atômicos que expõem as duas sub-redes do antiferromagneto na interface FM/AFM, originando um campo de troca interfacial de sinal alternado ($\pm H_{int}$). Essa modulação espacial do campo favorece a nucleação e a estabilização de paredes de domínio de 180° na fita ferromagnética centradas sob os degraus. Para substratos AFM com alta anisotropia, o padrão de magnetização foi considerado fixo, enquanto a configuração de equilíbrio da fita FM, sujeita a um campo de interface variável, foi determinada com base na teoria micromagnética. Utilizamos o formalismo de campo efetivo local e um esquema iterativo para resolver as equações que descrevem a dinâmica da magnetização. Adicionalmente, consideramos que o ângulo de vicinalidade é suficientemente pequeno para garantir que os degraus estejam bem espaçados e que as interações entre os momentos de degraus adjacentes possam ser desprezadas. Os resultados obtidos indicam que a formação de paredes de domínio é fortemente influenciada pelos parâmetros geométricos da fita — em especial sua espessura — e pela intensidade do campo de interface. Nossos resultados mostram que há um valor crítico do campo de interface necessário para a nucleação das paredes em diferentes dimensões da nanofita, verificando-se ainda que a largura das paredes é inversamente proporcional à intensidade do campo interfacial. No estudo da liberação, identificamos uma densidade crítica de corrente polarizada em spin necessária para promover o

¹ Universidade do Estado do Rio Grande do Norte

² Universidade Federal do Rio Grande do Norte



desprendimento das paredes. Para uma nanofita de ferro com 160 nm de comprimento, 20 nm de largura e 2 nm de espessura, foi obtido o valor crítico de 28,8 A/cm². Esses resultados destacam a importância do controle simultâneo da geometria da fita e da intensidade do campo interfacial para a manipulação precisa de paredes de domínio em sistemas FM/AFM, fornecendo subsídios relevantes para o projeto de memórias racetrack e de dispositivos de lógica spintrônica de alta eficiência.

Palavras-chave: Nanomagnetismo, Spintrônica, Dispositivos Spintrônicos, Paredes de domínio.

Abstract

The pinning and depinning of domain walls in ferromagnetic (FM) nanostrips grown on vicinal antiferromagnetic (AFM) substrates are phenomena of great relevance for the development of next-generation spintronic devices. The vicinality of the AFM substrate induces periodic atomic steps that expose the two AFM sublattices at the FM/AFM interface, giving rise to an interfacial exchange field with alternating sign ($\pm H_{int}$). This spatial modulation of the field favors the nucleation and stabilization of domain walls in the ferromagnetic strip. For AFM substrates with high anisotropy, the magnetization pattern was considered fixed, while the equilibrium configuration of the FM strip under a variable interfacial field was determined within the micromagnetic framework. The local effective-field formalism was employed together with an iterative scheme to solve the equations governing magnetization dynamics. Additionally, it was assumed that the vicinal angle is sufficiently small so that the steps are well separated and the interactions between adjacent step moments can be neglected. The results show that domain-wall formation is strongly influenced by the geometric parameters of the strip—particularly its thickness—and by the strength of the interfacial field. The critical field required for wall nucleation was determined for different nanostrip dimensions, and it was further verified that the wall width is inversely proportional to the interfacial field intensity. In the study of depinning, a critical spin-polarized current density was identified as necessary to trigger wall release. For an iron nanostrip with 160 nm length, 20 nm width, and 2 nm thickness, the critical value obtained was 28.8 A/cm². These findings highlight the importance of simultaneously controlling both the nanostrip geometry and the interfacial field intensity for the precise manipulation of domain walls in FM/AFM systems, providing valuable insights for the design of racetrack memories and high-efficiency spintronic logic devices.

Keywords: Nanomagnetism, Spintronics, Spintronic devices, Domain walls.

INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o estudo de paredes de domínio (PD) em nanoestruturas ferromagnéticas tem atraído crescente atenção devido ao seu potencial para aplicações em dispositivos de memória e lógica spintrônica. Em particular, sistemas constituídos por anéis metálicos ferromagnéticos nanométricos (FOERSTER, 2015) e fitas ferromagnéticas (FM) micrométricas com larguras e espessuras na escala nanométrica (BLÄSING, 2020) vêm sendo intensamente investigados. Nessas geometrias confinadas, a energia magnetostática desempenha papel fundamental na determinação dos estados de equilíbrio da magnetização, o que possibilita projetar e controlar os padrões de paredes de domínio para atender aplicações-chave, como células de memória não volátil (BLÄSING, 2020) e dispositivos de lógica magnética (ALLWOOD, 2005).

Uma das principais motivações para o estudo de PD em geometrias restritas é a promessa de um dispositivo de memória de alto desempenho, a *Racetrack Memory* (RM) (PARKIN, 2008), na qual a informação é armazenada em uma sequência de paredes de domínio confinadas em fitas ferromagnéticas estreitas (BLÄSING, 2020). Devido à forte anisotropia de forma, fitas retangulares longas e estreitas, fabricadas com materiais ferromagnéticos macios (FM), tendem a alinhar sua magnetização ao longo do eixo da fita, tornando-se plataformas ideais para o armazenamento e manipulação controlada de sequências de PD. Para que esse conceito seja viável, é necessário criar uma sequência periódica de centros de aprisionamento de paredes de domínio ao longo da fita, de modo a definir posições estáveis para cada PD.

Estudos recentes exploraram estratégias baseadas em saliências, constrições ou entalhes para introduzir barreiras de aprisionamento e controlar o movimento de PD (BLÄSING, 2020; PARKIN, 2008; HAYASHI, 2006; ZAMBANO, 2004; KLÄUI, 2008).

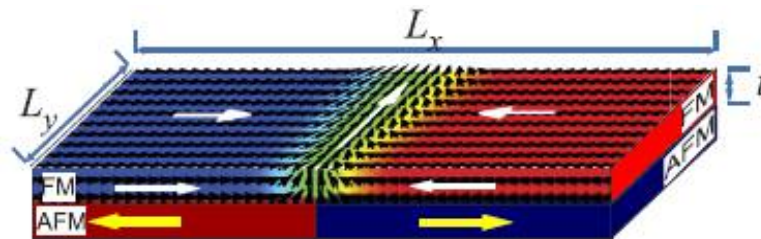
Entretanto, uma abordagem alternativa e promissora consiste em utilizar um substrato antiferromagnético (AFM) com anisotropia uniaxial orientada ao longo do eixo da fita FM. Nessa configuração, o acoplamento de troca interfacial gera um campo efetivo que, em conjunto com a anisotropia de forma da fita, estabiliza uma sequência periódica de paredes de domínios magnéticos.

Em trabalhos anteriores, foi demonstrado teoricamente que, em fitas FM/AFM vicinais, a intensidade crítica do campo magnético externo necessário para liberar uma sequência de PD é da mesma ordem de grandeza que o campo efetivo de troca de interface (DANTAS, 2009). Esse resultado reforça o papel central da interface FM/AFM no controle da dinâmica de paredes de domínio.

Este trabalho busca ampliar o entendimento do fenômeno, apresentando uma investigação teórica do impacto de correntes polarizadas em spin em paredes de domínios confinados por defeitos de interface. Consideramos um único defeito de

interface constituído por um degrau perpendicular ao eixo de fácil anisotropia do AFM, o qual separa terraços com sub-redes opostas. Supondo que o substrato AFM possui anisotropia uniaxial suficientemente alta, sua configuração magnética é tratada como congelada no estado antiferromagnético. Como ilustrado na figura 1, o defeito em degrau induz uma inversão na direção dos momentos magnéticos do AFM, alinhados ao longo de $\pm x$, o que gera um campo de troca interfacial alternado que atua sobre a fita FM. Esse campo produz a formação de um par de domínios ferromagnéticos separados por uma parede de domínio do tipo cabeça-a-cabeça, cuja estabilidade e liberação sob ação de corrente polarizada de spin são analisadas neste trabalho.

Figura 1. Representação esquemática de uma parede de domínio em uma fita ferromagnética com dimensões (L_x, L_y, t) aprisionada em um defeito de degrau de interface em um substrato AFM. As setas brancas são apenas um guia visual, e as setas amarelas indicam a direção dos momentos magnéticos do substrato nos terraços de interface.



Fonte: ANDRADE (2022, adaptação nossa).

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Consideramos uma nanofita ferromagnética com dimensões $L_x \times L_y \times t$, que correspondem, respectivamente, ao comprimento, à largura e à espessura da fita, conforme ilustrado na figura 1. A fita ferromagnética — que pode ser composta de ferro (Fe) ou da liga $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ (permalloy, Py) — está acoplada, por meio da energia de troca, à interface de um substrato antiferromagnético constituído por duas sub-redes.

No modelo considerado, os momentos magnéticos do plano de interface do substrato AFM encontram-se rigidamente alinhados ao longo da direção longitudinal da nanofita. Especificamente, eles se orientam na direção $-x$ para $x \leq \frac{L_x}{2}$ e na direção $+x$ para $x > \frac{L_x}{2}$. Essa configuração espacial impõe, por meio do campo de troca interfacial, a formação de uma parede de domínio magnético do tipo cabeça-a-cabeça na nanofita FM, conforme ilustrado na figura 1. Consideramos que o substrato AFM permanece congelado em sua configuração antiferromagnética de equilíbrio e que o acoplamento de troca é descrito por um campo efetivo H_{int} , aplicado ao longo do eixo x .

A estrutura magnética da nanofita é modelada no âmbito da teoria micromagnética, na qual a magnetização é tratada como um campo vetorial contínuo. Para a simulação, a nanofita é discretizada em células cúbicas com arestas $d=5$ nm, de modo a assegurar que o tamanho das células seja suficientemente maior que as dimensões atômicas, mas pequeno o bastante para representar com precisão as variações espaciais da magnetização.

Nesse caso, a densidade de energia magnética total do sistema é expressa por:

$$E_T = \frac{A}{d^2} \sum_{ij} (1 - \hat{m}_i \cdot \hat{m}_j) - K \sum_i (\hat{m}_i^x)^2 - M_s \vec{H} \cdot \sum_i \hat{m}_i - M_s \vec{H}_{int} \cdot \sum_j \hat{m}_j + \frac{M_s^2}{2} \sum_j \sum_k \left(\frac{\hat{m}_j \cdot \hat{m}_k}{n_{jk}^3} - \frac{3(\hat{m}_j \cdot \vec{n}_{jk})(\hat{m}_k \cdot \vec{n}_{jk})}{n_{jk}^5} \right) \quad (1)$$

onde o primeiro termo da expressão corresponde à energia de troca intrínseca, em que A representa a constante de rigidez de troca. O segundo termo corresponde à energia de anisotropia uniaxial, o terceiro descreve a energia de Zeeman, o quarto corresponde à energia de troca na interface e o último termo representa a energia de interação dipolar. Nessa formulação, M_s é a magnetização de saturação, \hat{m}_i é o vetor unitário que indica a direção do momento magnético da i -ésima célula, e n_{ij} é a distância entre as células i e j expressa em unidades do tamanho da célula d . Para os parâmetros magnéticos do $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ (permalloy), utilizamos $M_s=0,8 \times 10^5$ A/m e a constante de rigidez de troca $A=1,3 \times 10^{-11}$ J/m (McMICHAEL, 1997). Para o ferro (Fe), consideramos $M_s=1,7 \times 10^5$ A/m, $A=2,5 \times 10^{-11}$ J/m e a constante de anisotropia $K=4,7 \times 10^4$ J/m³ (McMICHAEL, 1997; PORRATI, 2004; VAZ, 2008).

A partir da densidade de energia magnética na equação (1), o campo efetivo local ($\vec{H}_{eff}(i)$) sobre o momento magnético de cada i -ésima célula é dado por:

$$\vec{H}_{eff}(i) = - \frac{1}{M_s} \frac{\partial E}{\partial \hat{m}_i} \quad (2)$$

O efeito de torque de transferência de spin (STT), no contexto do modelo de Slonczewski (SLONCZEWSKI, 1996), descreve a interação entre a corrente de spin polarizada e a magnetização local do material ferromagnético. Quando uma corrente elétrica atravessa uma camada ferromagnética, ela adquire polarização de spin e, ao incidir sobre outra camada magnética, transfere momento angular para o sistema, exercendo um torque sobre o vetor de magnetização $\vec{M}_i = M_s \hat{m}_i$.

O torque de Slonczewski pode ser escrito como:

$$\vec{\tau}_{STT} = \frac{|g|\mu_B J \beta}{2e\delta M_s^3} \vec{M}_i \times \vec{M}_i \times \vec{P} \quad (3)$$

onde $|g| \sim 2$ é o fator de Landé, μ_B é o magneton de Bohr, e a carga do elétron, J a densidade de corrente, δ é a espessura da camada ferromagnética, com P sendo o grau de polarização de spin e β é o fator de eficiência do torque de spin, dado por

$$\beta = \left[-4 + (1 + P)^3 + \left(3 + \frac{\hat{m} \cdot \hat{p}}{4P^{3/4}} \right) \right]^{-1} \quad (4)$$

Onde \hat{p} é o vetor unitário na direção da polarização de spin da corrente incidente.

A dinâmica de magnetização na presença de um campo externo e uma corrente de spin polarizada é descrita pela equação de Landau-Lifshitz-Gilbert-Slonczewski (LLGS):

$$\frac{d\vec{M}_i}{dt} = \gamma \left(\vec{M}_i \times \vec{H}_{eff} - \alpha \vec{M}_i \times \frac{d\vec{M}_i}{dt} \right) + \frac{|g|\mu_B J \beta}{2e\delta M_s^3} \vec{M}_i \times (\vec{M}_i \times \vec{P}), \quad (5)$$

onde γ é a razão giromagnética e α é um parâmetro de amortecimento. O termo duplo produto vetorial garante que o torque seja máximo quando \vec{M}_i é ortogonal a \hat{p} e nulo quando ambas estão paralelas ou antiparalelas, permitindo a manipulação coerente do estado magnético por meio da corrente. Esse mecanismo é fundamental para a operação de dispositivos spintrônicos, como válvulas de spin e junções de túnel magnéticas.

Neste trabalho, estamos interessados na condição de equilíbrio do sistema. Assim, consideramos a equação (5) no regime estacionário, impondo

$$\frac{d\vec{M}_i}{dt} = 0$$

de forma a determinar configurações de torque nulo e, consequentemente, estados magneticamente estáveis. O terceiro termo da equação (5) está associado ao torque produzido pela corrente polarizada em spin, podendo ser reescrito na forma de um campo efetivo — denominado campo de Slonczewski — dado por:

$$\vec{H}_J = \frac{|g|\mu_B J}{2e\delta M_s \gamma} \beta (\hat{m}_i \times \hat{p} - \alpha \hat{p}) \quad (6)$$

Por consequência, o campo de Slonczewski também deve ser considerado no cálculo do campo efetivo total, sendo somado ao campo derivado da energia total na equação (2).

3. ASPECTOS METODOLÓGICOS

Considerando que o estado com paredes de domínio não corresponde ao estado de energia mínima natural de uma fita ferromagnética e que, neste caso, o mecanismo responsável por sua formação é a alternância do campo de interface ($\pm H_{int}$), investigamos inicialmente a intensidade mínima desse campo necessária para estabilizar uma parede de domínio, em função dos parâmetros geométricos e magnéticos do sistema.

Nosso estudo é fundamentado na teoria micromagnética e utiliza o método de campo local autoconsistente para determinar a configuração de equilíbrio. O procedimento consiste em calcular a distribuição espacial da magnetização de forma que o momento magnético de cada *i*-ésima célula de simulação esteja alinhado ao respectivo campo efetivo local. Matematicamente, o problema envolve resolver um sistema de $2N$ equações acopladas, onde N é o número total de células de simulação. Para isso, foi desenvolvido um algoritmo numérico de alta complexidade que garante que o torque local sobre o momento magnético de cada célula seja aproximadamente nulo ($\vec{M}_i \times \vec{H}_{eff}(i) \approx 0$), onde o campo efetivo $\vec{H}_{eff}(i)$ é dado pela equação (2).

Inicialmente, a amostra foi saturada sob a aplicação de um campo magnético externo de alta intensidade, orientado ao longo da direção longitudinal da nanofita, de modo a minimizar a energia de troca interfacial em um dos domínios, em detrimento do outro. Em seguida, o campo externo foi gradualmente reduzido, permitindo a reversão da magnetização do domínio cuja orientação era desfavorável em relação ao campo de interface. Esse procedimento leva à formação de uma parede de domínio.

A partir da configuração de equilíbrio associada à formação da parede de domínio, realizamos simulações envolvendo a aplicação de uma corrente de spin polarizada J , injetada perpendicularmente ao plano da fita, com intensidade progressivamente crescente. O objetivo dessas simulações é determinar o valor crítico da densidade de corrente a partir do qual a parede de domínio perde sua estabilidade. Para esta etapa, incorporamos ao modelo o termo de torque de transferência de spin proposto por Slonczewski, o que permite descrever de forma adequada a dinâmica do sistema sob a ação da corrente, conforme expresso na equação (5).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

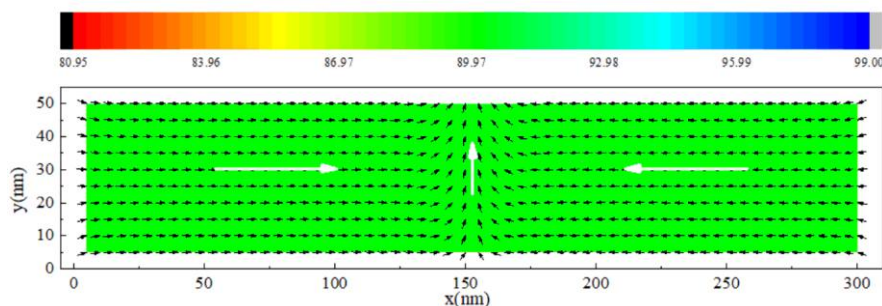
Nossos resultados evidenciam a existência de um valor crítico do campo de interface, acima do qual se verifica a formação de paredes de domínio em fitas FM depositadas sobre substratos AFM vicinais. Ademais, constatamos que esse campo crítico apresenta forte dependência em relação aos parâmetros geométricos e magnéticos do sistema.

A influência dos parâmetros geométricos e do material pode ser claramente evidenciada ao comparar os valores críticos do campo de interface necessários para a nucleação de paredes de domínio. Para uma nanofita de Fe com dimensões de 300 nm \times 50 nm \times 5 nm, o campo crítico obtido foi $H_{int}=8,35$ kOe. Em contraste, uma nanofita de Py com as mesmas dimensões requer um campo significativamente mais elevado, $H_{int}=32,3$ kOe, para que a formação da parede de domínio ocorra.

A diferença observada entre os valores críticos de H_{int} para Fe e Py pode ser atribuída ao papel da anisotropia magnetocristalina no Fe, que favorece o alinhamento da magnetização ao longo do eixo longitudinal da nanofita. No caso do Py, a ausência de anisotropia cristalina exige campos de interface significativamente mais elevados para induzir a formação da parede de domínio.

A Figura 2 ilustra a configuração de magnetização resultante, evidenciando a formação de uma parede de domínio localizada aproximadamente no centro da nanofita, separando dois domínios magnéticos de orientação oposta. A parede apresenta caráter *head-to-head*, uma vez que a magnetização de ambos os domínios aponta em direção à parede. O mapa de cores representa o ângulo da magnetização em relação ao eixo perpendicular ao plano da amostra (z). Nesse caso, a nanofita, com espessura de 5 nm, foi modelada por um único plano de células de simulação, o que favorece a orientação da magnetização no plano xy. Tal característica é confirmada pela predominância da região em verde na figura 2, correspondente a um ângulo de 90°, ou seja, magnetização essencialmente confinada ao plano da amostra.

Figura 2 – Padrão de magnetização de uma parede de domínio em uma nanofita ferromagnética de Fe(300 nm, 50 nm, 5 nm). As setas pretas indicam a orientação dos momentos magnéticos das células de simulação, enquanto as setas brancas maiores são utilizadas como guia visual para destacar a estrutura da parede de domínio. A barra de cores superior representa o ângulo da magnetização em relação ao plano da amostra.

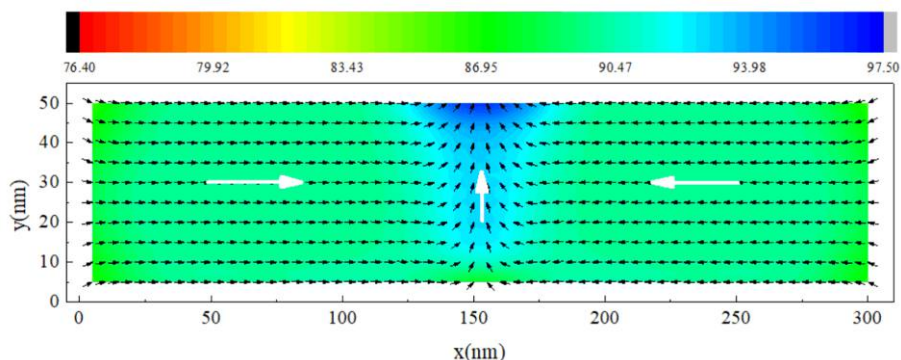


Fonte: Autora (2025)

Adicionalmente, realizamos simulações variando a espessura da nanofita de 5 para 10 nm. Os resultados indicaram que o aumento da espessura exige um campo de interface mais intenso para a nucleação de paredes de domínio. Para o caso do Fe, o valor crítico encontrado foi $H_{int}=20,1$ kOe.

Para o Py, foram realizadas simulações semelhantes, variando H_{int} , porém não foi identificado um valor mínimo capaz de induzir a formação estável de paredes de domínio nas espessuras analisadas. Esse comportamento pode ser atribuído à ausência de anisotropia uniaxial no Py, o que dificulta a estabilização das paredes de domínio e torna necessária uma contribuição interfacial mais intensa. Nossos resultados sugerem que, para o Py, seria necessária uma espessura menor para que o campo de interface atuasse de forma efetiva em todo o volume da nanofita. Essa tendência foi confirmada nos casos em que consideramos apenas um único plano de células de simulação, em que foi possível observar a formação de paredes de domínio.

Figura 3 – Padrão de magnetização de uma parede de domínio em uma nanofita ferromagnética de Fe (300 nm, 50 nm, 10 nm). As setas pretas indicam a orientação dos momentos magnéticos das células de simulação, enquanto as setas brancas maiores são utilizadas como guia visual para destacar a estrutura da parede de domínio. A barra de cores superior representa o ângulo da magnetização em relação ao plano da amostra.



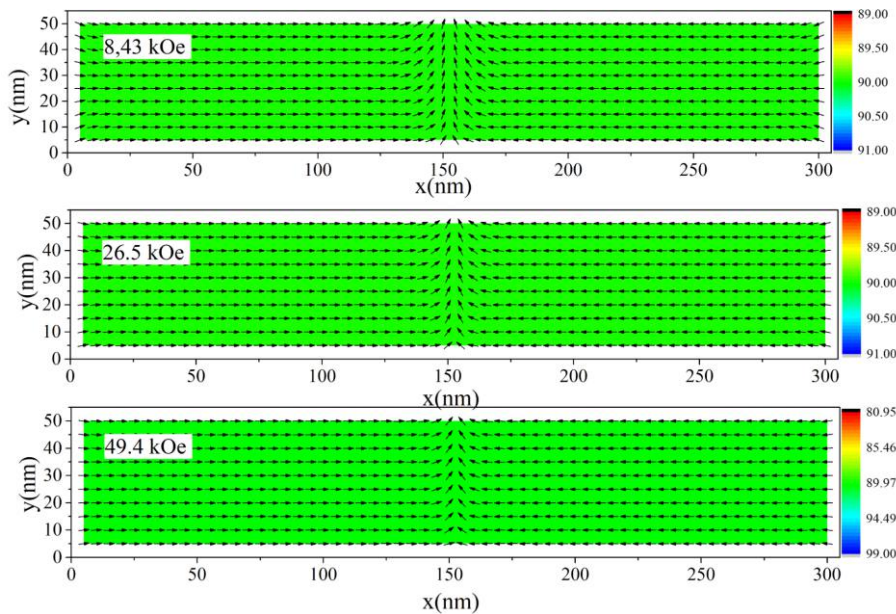
Fonte: Autora (2025)

A Figura 3 apresenta a formação de uma parede de domínio em uma nanofita de Fe (300 nm, 50 nm, 10 nm), localizada no centro da amostra e separando dois domínios magnéticos opostos. Para este caso, foi considerado um campo de interface de $H_{int}=20,1$ kOe e uma espessura de $t=10$ nm, correspondente a dois planos de simulação. Essa maior espessura permite que a magnetização apresente uma componente fora do plano xy com maior facilidade. Observa-se que, na região da parede de domínio, a coloração azul no mapa de ângulos corresponde a uma inclinação de aproximadamente $97,5^\circ$ em relação ao eixo z , caracterizando um desvio significativo da magnetização.

Esses resultados confirmam observações anteriores reportadas por Júnior (2019), reforçando que a formação e a estabilidade das paredes de domínio dependem criticamente não apenas da intensidade do campo de interface, mas também dos parâmetros geométricos do sistema.

A Figura 4 apresenta o padrão de magnetização em remanência para nanofitas de Fe ($300\text{ nm} \times 50\text{ nm} \times 5\text{ nm}$) sob diferentes intensidades do campo de interface (a) $H_{int}=8,43\text{ kOe}$, (b) $H_{int}=26,5\text{ kOe}$ e (c) $H_{int}=49,4\text{ kOe}$. Esses resultados evidenciam que a largura da parede de domínio é fortemente influenciada pela intensidade do campo de interface, exibindo uma relação inversamente proporcional — ou seja, o aumento do campo de interface resulta na diminuição da largura da parede de domínio.

Figura 4 – Padrão de magnetização de uma parede de domínio em uma nanofita ferromagnética de Fe(300 nm , 50 nm , 10 nm), com os seguintes campos de interface (a) $H_{int}=8,43\text{ kOe}$, (b) $H_{int}=26,5\text{ kOe}$ e (c) $H_{int}=49,4\text{ kOe}$. As setas pretas indicam a orientação dos momentos magnéticos das células de simulação. A barra de cores superior representa o ângulo da magnetização em relação ao plano da amostra.

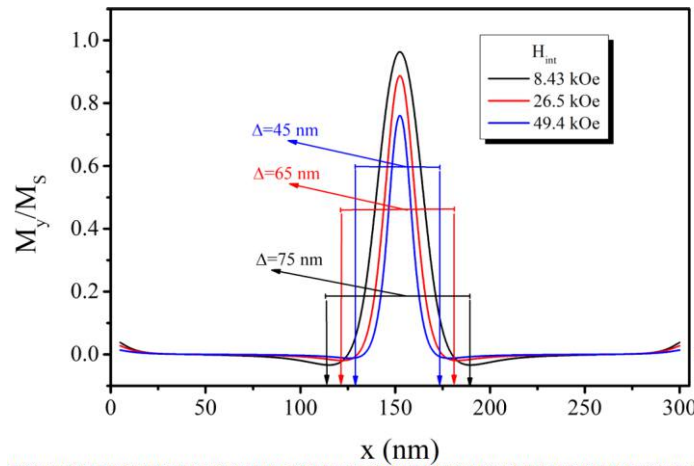


Fonte: Autora (2025)

A Figura 5 mostra a variação da componente y da magnetização ao longo da linha $y = 50\text{ nm}$ para as mesmas amostras apresentadas na Figura 4, correspondentes a: (a) $H_{int}=8,43\text{ kOe}$, (b) $H_{int}=26,5\text{ kOe}$ e (c) $H_{int}=49,4\text{ kOe}$. As curvas obtidas revelam que a componente y da magnetização permanece nula nas regiões associadas aos domínios magnéticos e atinge um valor máximo no centro das paredes de domínio, caracterizando seu perfil transversal típico.

Com base nessa distribuição, a largura das paredes de domínio foi estimada considerando a extensão da região em que a componente y assume valores distintos de zero. A partir dessa análise, foram obtidas larguras de 75 nm , 65 nm e 45 nm para os casos (a), (b) e (c), respectivamente, confirmando a tendência de redução sistemática da parede de domínio com o aumento do campo de interface.

Figura 5 – Variação da componente y da magnetização em função de x para nanofitas de Fe ($300 \text{ nm} \times 50 \text{ nm} \times 5 \text{ nm}$), avaliada na posição $y = 50 \text{ nm}$. As curvas ilustram a dependência da largura da parede de domínio (Δ) em relação à intensidade do campo de interface.



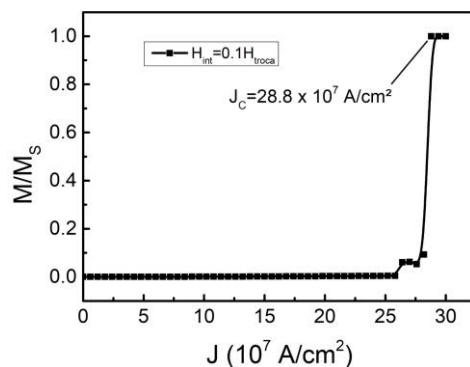
Fonte: Autora (2025)

No contexto do desenvolvimento de nanodispositivos spintrônicos, a transferência de torque por corrente polarizada em spin (*spin-transfer torque*, STT) é um dos fenômenos mais relevantes. Nesse mecanismo, elétrons polarizados em spin transferem momento angular para os momentos magnéticos locais, gerando um torque que pode modificar a configuração magnética do sistema. Esse efeito é descrito pela equação (6), na qual o campo efetivo associado à densidade de corrente apresenta componentes tanto perpendiculares quanto paralelas à direção de polarização da corrente.

Para investigar o processo de liberação de uma parede de domínio induzida por corrente de spin polarizada, considerou-se uma nanofita de Fe com dimensões de $160 \text{ nm} \times 20 \text{ nm} \times 2 \text{ nm}$, acoplada a um antiferromagneto (AFM) vicinal sob a ação de um campo de interface de $\pm 3,675 \text{ kOe}$. Nessas condições, o estado de remanência é caracterizado pela presença de uma parede de domínio localizada no centro do degrau, exatamente na região onde ocorre a inversão da orientação do campo de interface.

Em seguida, foi aplicada uma densidade de corrente de spin polarizada (J) perpendicular ao plano da nanofita e com polarização ao longo do eixo x, de modo a garantir que o torque de transferência de spin atue exclusivamente na região da parede de domínio, conforme descrito na equação (3). O fenômeno observado decorre do fato de que os elétrons polarizados em spin transferem momento angular para os momentos magnéticos locais, produzindo um torque de transferência de spin (*spin-transfer torque*, STT) que promove o deslocamento da parede de domínio.

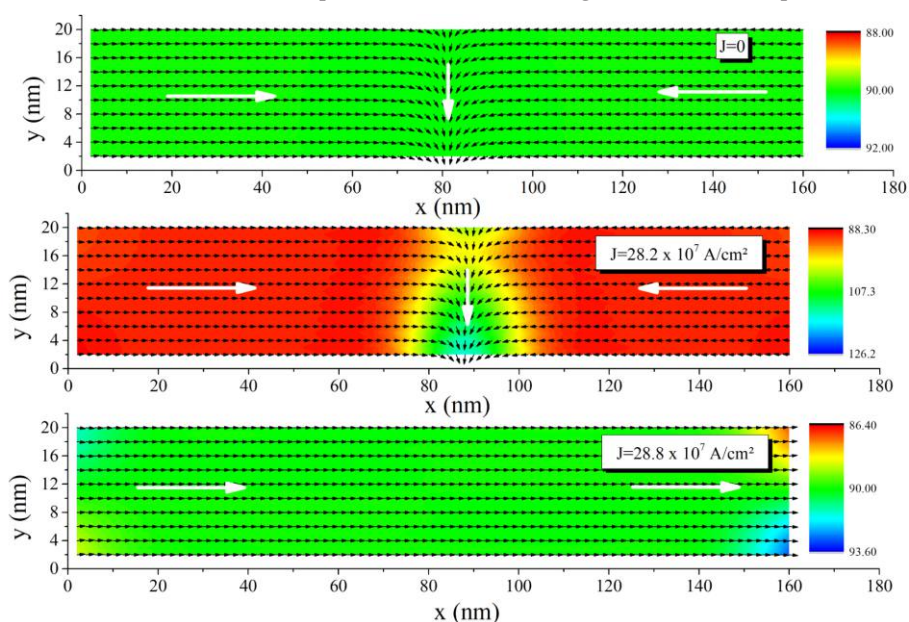
Figura 6 – Componente x da magnetização em função da densidade de corrente de spin polarizada (J) de para uma nanofita de Fe ($160 \text{ nm} \times 20 \text{ nm} \times 2 \text{ nm}$), com $H_{int} = \pm 3,675 \text{ kOe}$.



Fonte: Autora (2025).

A figura 6 mostra a componente x da magnetização da nanofita de Fe ($160 \text{ nm} \times 20 \text{ nm} \times 2 \text{ nm}$), com $H_{int} = \pm 3,675 \text{ kOe}$. Na ausência de corrente de spin polarizada, a parede de domínio permanece centrada no degrau da superfície vicinal, exatamente na região onde ocorre a inversão de orientação do campo de interface. Nessa condição, como previsto, a componente x da magnetização é nula. À medida que a densidade de corrente de spin é incrementada, observa-se o surgimento de um desbalanceamento na componente x da magnetização a partir de $J = 26 \times 10 \text{ A/cm}^2$, indicando que um dos domínios passa a prevalecer sobre o outro, deslocando o centro da parede. Para $J = 28,8 \times 10 \text{ A/cm}^2$, verifica-se a completa liberação da parede de domínio, com a magnetização atingindo saturação ao longo do eixo x.

Figura 7 - Ilustração da liberação de uma parede de domínio em uma nanofita de Fe com 160 nm de comprimento, 20 nm de largura e 2 nm de espessura.



Fonte: Autora (2025)

A figura 7 ilustra o padrão de magnetização da nanofita de Fe ($160 \text{ nm} \times 20 \text{ nm} \times 2 \text{ nm}$), com $H_{int} = \pm 3,675 \text{ kOe}$, conforme curva da figura 6, para (a) $J=0$, (b) $J = 28,2 \times 10 \text{ A/cm}^2$ e (c) $J = 28,8 \times 10 \text{ A/cm}^2$.

É importante destacar que o deslocamento da PD não é linear em função da densidade de corrente. Isso se deve ao fato de que a energia de interface atua como barreira estabilizadora, impedindo que a parede se forme em posições distantes do ponto de descontinuidade do campo de interface. Apenas quando a densidade de corrente supera um valor crítico é que ocorre a liberação completa.

Assim, os resultados obtidos permitem concluir que, para as condições estabelecidas na Figura 6, a densidade crítica de corrente necessária para liberar a parede de domínio é de aproximadamente $28,8 \times 10 \text{ A/cm}^2$.

CONCLUSÕES

Este estudo teve como motivação o potencial das paredes de domínio (PDs) em dispositivos de memória magnética e a necessidade de compreender o comportamento de sistemas em escala nanométrica. Por meio de simulações micromagnéticas, demonstramos de forma sistemática que a formação de PDs é fortemente dependente do campo de interface.

Determinamos os valores críticos desse campo para nanofitas de Fe e Py com dimensões de $300 \text{ nm} \times 50 \text{ nm} \times 5 \text{ nm}$, obtendo $8,35 \text{ kOe}$ para o Fe e $32,3 \text{ kOe}$ para o Py. A análise de diferentes geometrias revelou que o aumento da espessura da nanofita exige campos de interface mais intensos para a formação de PDs, confirmando a influência direta dos parâmetros geométricos na estabilidade das estruturas magnéticas.

Também verificamos que a largura da PD apresenta dependência inversamente proporcional ao campo de interface: campos mais intensos resultam em paredes de domínio mais estreitas. Essa relação é consistente com previsões teóricas e contribui para a compreensão do controle de textura magnética em dispositivos funcionais.

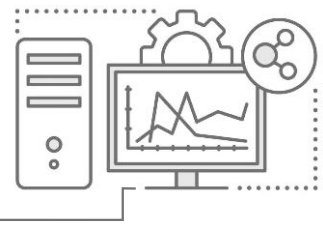
Por fim, investigamos a dinâmica de PDs sob ação de corrente de spin polarizada (spin-transfer torque). Para uma nanofita de Fe ($160 \text{ nm} \times 20 \text{ nm} \times 2 \text{ nm}$), identificamos que a liberação da parede de domínio ocorre para densidades de corrente de $28,8 \times 10 \text{ A/cm}^2$, valor que representa o limiar necessário para induzir a saturação da magnetização ao longo do eixo x.

Esses resultados fornecem subsídios importantes para o projeto de nanodispositivos spintrônicos, permitindo a otimização de parâmetros geométricos e de excitação elétrica para o controle eficiente de paredes de domínio.

REFERÊNCIAS

- ALLWOOD, A. et al. Magnetic domain-wall logic, *Science* V. 309, p. 1688 (2005).
- BLÄSING, R., et al. Magnetic Racetrack Memory: From Physics to the Cusp of Applications Within a Decade, *Proceedings of the. IEEE* v. 108, p. 1303 (2020).
- DANTAS, A. L. et al. Depinning field of a periodic domain wall array in vicinal nanowires. *Journal of Applied Physics*, vol. 105, p. 07C116 (2009)
- FOERSTER, M., et al. Domain wall memory device, *Handbook of Spintronics*, edited by Y. Xu, D. D. Awschalom, and J. Nitta (Springer Science+ Business Media, Dordrecht, 2015), pp. 1387–1441.
- HAYASHI, M. et al. Dependence of Current and Field Driven Depinning of Domain Walls on Their Structure and Chirality in Permalloy Nanowires, *Physical Review Letters*. vol. 97, p. 207205 (2006).
- KLÄUI, M., Head-to-head domain walls in magnetic nanostructures, *Journal of Physics: Condensed Matter* vol. 20, p.313001 (2008).
- McMICHAEL R. D. and DONAHUE, M. J., Head-to-head domain wall structures in thin magnetic strips, *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 33, p. 4167 (1997)
- PORRATI, F. and HUTH, M., Diagram of the states in arrays of iron nanocylinders. *Journal of Applied Physics*, vol. 85, p. 3157 (2004).
- PARKIN, Stuart Stephen Papworth. et al. Racetrack Memory: The Future of Data Storage. Disponível em: <https://www.ibm.com/ibm/history/ibm100/us/en/icons/racetrack/>. Acesso em: 02 de Outubro de 2020.
- PARKIN, S. S. P.; HAYASHI, M.; THOMAS, L. Magnetic Domain Wall Racetrack Memory, *Science*, vol.320, p. 190, 2008.
- SLONCZEWSKI, J. Current-Driven Excitation of Magnetic Multilayer. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 159, pp. L1-L7, 1996.
- ZAMBANO, A. J. and PRATT Jr, W. P., Detecting domain-wall trapping and motion at a constriction in narrow ferromagnetic wires using perpendicular-current giant magnetoresistance, *Applied Physical Letters*. vol. 85, p. 1562 (2004).
- VAZ, C. A. F., BLAND, J. A. C. and LAUHOFF, G. Magnetism in ultrathin film structures, *Reports on Progress in Physics*, vol. 71, p. 056501 (2008).





CAPÍTULO 2

DOI: 10.63951/synapse978-65-88890-61-5_2

PEDRO VITOR HENRIQUE FAUSTINO¹
THAISA GRASIELLY DE MORAIS JALES¹
ARTUR DA SILVA CARRIÇO²
ANA LÚCIA DANTAS¹

DINÂMICA DE VÓRTICES MAGNÉTICOS EM NANOELEMENTOS FERROMAGNÉTICOS: SIMULAÇÕES MICROMAGNÉTICAS

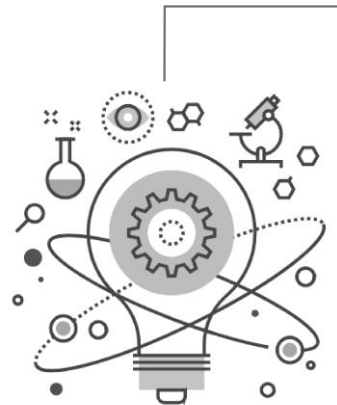
Resumo

O desenvolvimento de dispositivos de comunicação menores e mais eficientes tem impulsionado pesquisas em nano-osciladores magnéticos, capazes de operar em frequências de gigahertz com baixo consumo energético. A compreensão de suas frequências de ressonância é essencial para otimizar o desempenho e possibilitar sua integração em aplicações como internet das coisas (IoT), sensores e antenas. Neste capítulo, investigamos a suscetibilidade dinâmica associada à formação e à excitação de vórtices magnéticos em nanoelementos retangulares, por meio de simulações micromagnéticas que consideram energias de troca, anisotropia, interação dipolar e Zeeman. Com base na teoria micromagnética, discretizamos os elementos em células de 5 nm e, com um código próprio, obtivemos por simulação a configuração de equilíbrio. Após a saturação magnética e relaxação até a remanência, aplicou-se um campo oscilante de baixa intensidade (10,0 μ T) ao longo do eixo x, varrendo de 0–3 GHz para Fe e 0–1,5 GHz para Py. Confirmou-se a formação de vórtices em geometrias específicas, com o Fe apresentando estabilidade em menores alturas devido à sua maior magnetização de saturação. Para dimensões de $60 \times 80 \times 30$ nm³, os três primeiros picos de suscetibilidade foram 0,67, 1,65 e 2,72 GHz (Fe) e 0,29, 0,75 e 0,97 GHz (Py). Em geometrias maiores, observou-se a formação de duplo vórtice sem alteração da frequência fundamental. Esses resultados evidenciam o papel crucial dos parâmetros geométricos e magnéticos na dinâmica de vórtices, oferecendo subsídios para o design de nanoestruturas aplicáveis em comunicações sem fio espintrônicas.

Palavras-chave: Vórtice magnético; Nanoestruturas magnéticas; Suscetibilidade magnética; Nano-osciladores.

¹ Universidade do Estado do Rio Grande do Norte

² Universidade Federal do Rio Grande do Norte



Abstract

The development of smaller and more efficient communication devices has driven research into magnetic nano-oscillators capable of operating at gigahertz frequencies with low power consumption. Understanding their resonance frequencies is crucial for optimizing performance and enabling integration into applications such as the Internet of Things (IoT), sensors, and antennas. In this chapter, we investigate the dynamic susceptibility related to the formation and excitation of magnetic vortices in rectangular nanoelements through micromagnetic simulations that consider exchange energies, anisotropy, dipolar interactions, and Zeeman effects. Based on micromagnetic theory, we discretized the elements into 5 nm cells and, using our own code, obtained the equilibrium configuration through simulation. After magnetic saturation and relaxation to remanence, a low-intensity oscillating field (10.0 μT) was applied along the x -axis, sweeping from 0–3 GHz for Fe and 0–1.5 GHz for Py. Vortex formation was confirmed in specific geometries, with Fe showing stability at lower heights due to its higher saturation magnetization. For dimensions of $60 \times 80 \times 30 \text{ nm}^3$, the first three susceptibility peaks were 0.67, 1.65, and 2.72 GHz (Fe) and 0.29, 0.75, and 0.97 GHz (Py). In larger geometries, double vortex formation was observed without changing the fundamental frequency. These results highlight the crucial role of geometric and magnetic parameters in vortex dynamics, offering valuable insights for designing nanostructures utilized in wireless communications and spintronics.

Keywords: magnetic vortex; magnetic nanostructures; magnetic susceptibility; nano-oscillators



INTRODUÇÃO

O avanço da nanotecnologia tem proporcionado importantes descobertas científicas e tecnológicas, abrindo novas perspectivas para a manipulação de propriedades magnéticas em escala nanométrica. Nesse cenário, o nanomagnetismo e a spintrônica consolidam-se como áreas estratégicas para o desenvolvimento de dispositivos de memória não volátil e sensores de alta eficiência e sistemas de comunicação em frequências cada vez mais elevadas (Fert, 2008; Zutic; Fabian; Das Sarma, 2004). Entre os fenômenos magnéticos investigados, destacam-se os vórtices magnéticos, configurações estáveis resultantes do equilíbrio entre energias de troca e de interação dipolar, que emergem naturalmente em nanoestruturas com dimensões e geometrias específicas (Shinjo et al., 2000; Wachowiak et al., 2002).

A dinâmica desses vórtices tem despertado crescente interesse, uma vez que sua excitação por campos oscilantes gera respostas ressonantes na faixa de gigahertz, tornando-os promissores como nano-osciladores, nanoantenas e elementos ativos em dispositivos spintrônicos (Gusliencko, 2008; Choe *et al.*, 2004). O estudo de suas frequências de ressonância fornece informações cruciais para a otimização de desempenho e para o design de novas arquiteturas aplicáveis em Internet das Coisas (IoT), redes de comunicação sem fio e sensores magnéticos de precisão.

Neste contexto, este capítulo investiga como parâmetros geométricos (dimensões e forma dos nanoelementos) e magnéticos (magnetização de saturação, anisotropia e interação dipolar) influenciam as frequências de ressonância de vórtices magnéticos isolados em nanoelementos de Fe e Py. Para tal, empregamos simulações micromagnéticas com base no cálculo do tensor de suscetibilidade dinâmica, permitindo caracterizar os modos fundamentais e excitados desses sistemas e discutir suas implicações para futuras aplicações em dispositivos de comunicação e spintrônica avançada.

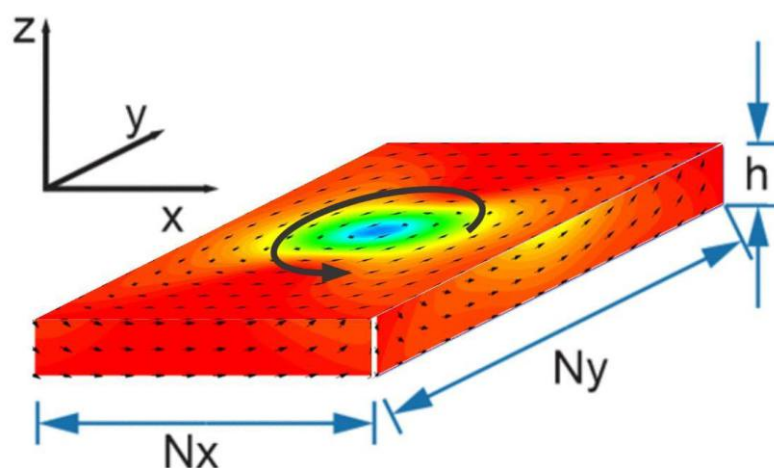
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A ordem magnética de um ferromagneto resulta do equilíbrio entre contribuições energéticas moduladas por parâmetros extrínsecos e intrínsecos.

Entre os extrínsecos destacam-se a temperatura e o campo magnético externo aplicado. Entre os intrínsecos, sobressaem a magnetização de saturação (M_S), que fixa a densidade de momento magnético; a constante de rigidez de troca (A), que impede variações espaciais rápidas da magnetização; e a constante de anisotropia cristalina (K), que definem direções preferenciais de magnetização. Em nanoestruturas, o confinamento geométrico torna-se determinante: dimensões laterais, espessura e formato da amostra controlam a energia de interação dipolar por meio dos fatores de desmagnetização, alterando a estabilidade relativa de fases magnéticas (monodomínio, paredes de domínio, vórtices etc.). Essa competição entre as energias de troca, de anisotropia, de interação dipolar e energia Zeeman é o cerne da teoria micromagnética, que modela a variação da magnetização como um contínuo e explica por que, em certas razões de aspectos geométricos e materiais, vórtices magnéticos emergem como estados de baixa energia.

Este trabalho investiga a configuração de equilíbrio e a susceptibilidade dinâmica de nanoelementos retangulares de Fe e Py, com dimensões $N_x \times N_y \times h$, conforme o esquema da Figura 1.

Figura 1. Representação esquemática de um nanoelemento ferromagnético com dimensões $N_x \times N_y \times h$. As setas pretas menores indicam as orientações dos momentos magnéticos, enquanto a seta maior serve apenas como guia visual para destacar o vórtice magnético.



Fonte: Autor, 2025

A nanoestrutura ferromagnética é discretizada em células cúbicas de aresta $d = 5$ nm. A densidade de energia magnética total é dada por:

$$E = \frac{A}{d^2} \sum_j \sum_k (1 - \hat{m}_j \cdot \hat{m}_k) - M_s \vec{H} \cdot \sum_j \hat{m}_j - K \sum_j (m_x)^2 \quad (1)$$

$$+ \frac{M_s}{2} \sum_j \sum_k \left(\frac{\hat{m}_j \cdot \hat{m}_k}{n_{jk}^3} - \frac{3(\hat{m}_j \cdot \hat{n}_{jk})(\hat{m}_k \cdot \hat{n}_{jk})}{n_{jk}^5} \right).$$

Onde o primeiro termo representa a energia de troca, sendo A a constante de rigidez de troca. O versor de magnetização local é $\hat{m}_i = \vec{M}_i/M_s$ ($i = 1, \dots, N$), com $|\hat{m}_i| = 1$; aqui, i é a magnetização média na célula i e M_s a magnetização de saturação do material. O segundo termo corresponde à energia de Zeeman associada ao campo externo aplicado H . O terceiro termo descreve a energia de anisotropia cristalina uniaxial, com constante K (e eixo fácil \hat{i}). Por fim, o quarto termo está associado à energia de interação dipolar, na qual $n_{jk} = |\vec{r}_j - \vec{r}_k|/d$ é a distância adimensional entre as células j e k , expressa em unidades do tamanho de célula d .

Para o ferro (Fe), adotamos os seguintes parâmetros: $M_s = 1,7 \times 10^5$ A/m, $A = 2,5 \times 10^{-11}$ J/m e $K = 4,7 \times 10^{-4}$ J/m³ (Dantas, 2020; McMichael; Donahue, 1997). Para o permalói (Ni₈₀Fe₂₀, também conhecido como PyTM), utilizamos os valores $M_s = 0,8 \times 10^5$ A/m e $A = 1,3 \times 10^{-11}$ J/m (Diniz *et al.*, 2024). A partir da densidade de energia magnética na equação (1), o campo efetivo local sobre o momento magnético de cada célula é dado por:

$$\vec{H}_{eff}(i) = \left(-\frac{1}{M_s} \right) \left(\frac{\partial E}{\partial \hat{m}_i} \right). \quad (2)$$

Para o cálculo da susceptibilidade dinâmica em sistemas magnéticos nanoestruturados, restringimo-nos à análise dos efeitos dinâmicos na presença de campos externos oscilantes. Nesse contexto, consideramos a aplicação de um campo de micro-ondas transversal fraco, descrito por

$$\vec{h}(t) = h_0 e^{i\omega t}, \quad (3)$$

o qual pode estar orientado ao longo de uma direção específica. Esse campo atua como uma pequena perturbação, induzindo um torque sobre o sistema magnético inicialmente em equilíbrio (Jales *et al.*, 2024).

Nesse caso, a energia magnética descrita na equação (1) é acrescida de um termo adicional do tipo energia de Zeeman, associado ao campo oscilante, expresso por:

$$E_{osc} = -M_s \sum_{i=1}^N \hat{m}_i \cdot \vec{h}(t) \quad (4)$$

onde a soma em i se estende sobre todos os momentos magnéticos da nanoestrutura, M_s representa a **magnetização de saturação**, \hat{m}_i denota a direção do momento magnético da célula i e $\vec{h}(t)$ corresponde ao **campo oscilante aplicado**, que interage com todos os momentos magnéticos do sistema.

O estudo da dinâmica de sistemas magnéticos inicia-se a partir da equação de movimento de Landau–Lifshitz (Morish, 1980):

$$\frac{d\vec{m}_i(t)}{dt} = -\gamma \vec{m}_i(t) \times \vec{h}_{eff}(i, t) \quad (5)$$

onde γ é razão giromagnética e $\vec{h}_{eff}(i, t) = \vec{H}_{eff}(i) + \vec{h}(t)$ representa o campo efetivo atuante na célula i . Esse campo efetivo incorpora as contribuições da interação de troca, da anisotropia uniaxial, do campo externo aplicado, das interações dipolares e do campo oscilante, que age localmente sobre o momento magnético de cada célula.

A partir da **configuração de equilíbrio**, considera-se que cada momento magnético oscila em torno do eixo de equilíbrio $\vec{m}_0(i)$, apresentando pequenas amplitudes perpendiculares a esse eixo, denotadas por $\delta\vec{m}_i(t)$. Assim, a magnetização local pode ser escrita como

$$\vec{m}_i(t) = \vec{m}_0(i) + \delta\vec{m}_i(t) \quad (6)$$

onde $\vec{m}_0(i)$ representa a direção de equilíbrio do momento magnético da célula i e $\delta\vec{m}_i(t)$ corresponde à sua **perturbação transversal de pequena amplitude** (Jales *et al.*, 2024).

Portanto, resolvendo a equação (5) a partir da equação (6) e linearizando as equações de movimento com relação às pequenas amplitudes, encontramos o seguinte conjunto de $2N$ equações acopladas:

$$\begin{aligned} i\Omega \delta m_{i,\alpha} &= \delta m_{i,\beta} h_{eff}(i) - m_0(i) h_\beta(t) \\ i\Omega \delta m_{i,\beta} &= -\delta m_{i,\alpha} h_{eff}(i) + m_0(i) h_\alpha(t) \end{aligned} \quad (7)$$

onde $\Omega = \frac{\omega}{\gamma}$ e ω é a frequência do campo oscilante. As quantidades $\delta m_{i,\alpha}$ e $\delta m_{i,\beta}$ representam as amplitudes das duas componentes perpendiculares à direção de equilíbrio do momento magnético em cada célula i .

Em seguida, expressamos os vetores de magnetização na **base cartesiana fixa** (x, y, z) e, a partir disso, calculamos todos os componentes do **tensor de susceptibilidade dinâmica**, definido por:

$$\chi_{ij} = \sum_l \left(\frac{\partial m_i(l)}{\partial h_j(l)} \right) = \sum_l \left(\frac{\partial m_i(l)}{\partial h_\alpha(l)} \cdot \frac{\partial h_\alpha(l)}{\partial h_j(l)} + \frac{\partial m_i(l)}{\partial h_\beta(l)} \cdot \frac{\partial h_\beta(l)}{\partial h_j(l)} \right), \quad (8)$$

onde $m_i(l)$ denota a componente i do momento magnético da célula l , e h_j representa a componente do campo externo oscilante, ambos definidos na base cartesiana fixa ($i, j = x, y$ ou z).

3. METODOLOGIA

Para o estudo da dinâmica de sistemas magnéticos nanoestruturados, é essencial identificar a configuração magnética de equilíbrio. Essa configuração corresponde à disposição em que os momentos de cada célula ($i = 1, \dots, N$) estão alinhados com o campo efetivo local definido na equação (2), condição que implica em torque magnético aproximadamente nulo ($\vec{\tau} = \hat{m}_i \times \vec{H}_{eff}(i)$). Devido ao campo de interação dipolar, esse problema resulta em um sistema de N equações acopladas, resolvidas numericamente por meio de um algoritmo iterativo e autoconsistente.

A determinação das fases magnéticas inicia-se aplicando-se um campo externo suficientemente intenso para saturar a magnetização na direção do campo. Em seguida, o campo é reduzido gradualmente até $H = 0$, obtendo-se a fase correspondente ao estado de remanência. Para cada valor do campo externo, a configuração de equilíbrio é ajustada de modo que os momentos magnéticos ($\hat{m}_i, i = 1, \dots, N$) permaneçam alinhados ao respectivo campo local, garantindo que a variação angular entre cada momento magnético e o campo local age sobre ele seja menor do 10^{-6} rad em todas as células (Dantas *et al.*, 2020).

A partir da configuração de equilíbrio $\{\vec{m}_0(i), i = 1, \dots, N\}$, o momento magnético de cada célula I é liberado para oscilar com o campo oscilante em torno da sua posição de equilíbrio. As variáveis perpendiculares a essa posição são então determinadas pelo conjunto das $2N$ equações (7). Para um dado valor de Ω , obtêm-se as amplitudes perpendiculares à direção de magnetização de equilíbrio $\vec{m}_0(i)$. A equação (8) permite, nesse caso, identificar a contribuição de todas as células $\{i = 1, \dots, N\}$ para o tensor de suscetibilidade (Jales *et al.*, 2024).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

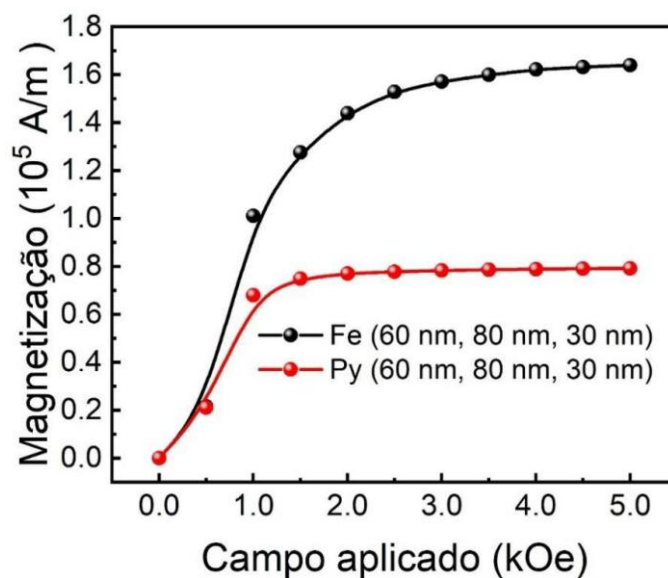
Investigamos as configurações de equilíbrio e a dinâmica de nanoelementos retangulares de Fe e Py, ambos com dimensões de $60 \text{ nm} \times 80 \text{ nm} \times 30 \text{ nm}$. As configurações de equilíbrio foram obtidas a partir da condição em que, para cada intensidade de campo externo aplicado, os momentos magnéticos se orientam segundo o campo efetivo local que atua sobre eles.

Para obter a configuração de remanência, as amostras foram inicialmente saturadas com a aplicação de um campo externo de 5,0 kOe ao longo do eixo x (Figura 2). Em seguida, o campo foi reduzido gradualmente até $H = 0$, estabelecendo a configuração de equilíbrio. As curvas de magnetização mostram que, na ausência de campo externo, a magnetização total na direção aplicada é nula. Ainda assim, os nanoelementos preservam ordem magnética, evidenciada pela formação de um vórtice.

A Figura 3 apresenta os perfis de magnetização no estado de remanência para os nanoelementos retangulares de Fe (painel esquerdo) e Py (painel direito), ambos com dimensões de $60 \text{ nm} \times 80 \text{ nm} \times 30 \text{ nm}$. Em ambos os casos, a configuração corresponde a um estado de vórtice. Os painéis ilustram os padrões de magnetização nas superfícies superiores dos nanoelementos, sem que tenham sido identificadas variações significativas nos planos internos. Embora ambos os nanoelementos apresentem vórtices com ângulo azimutal em torno de 70° , no Py a ausência de anisotropia, aliada à constante de rigidez aproximadamente duas vezes menor que a do Fe, promove um desvio mais acentuado dos momentos magnéticos

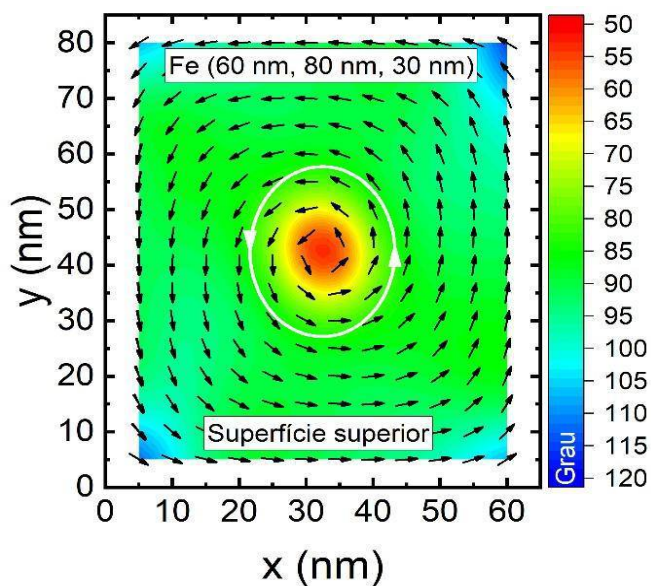
no centro do vórtice para fora do plano da amostra, atingindo cerca de 40° , em comparação a 50° para o Fe.

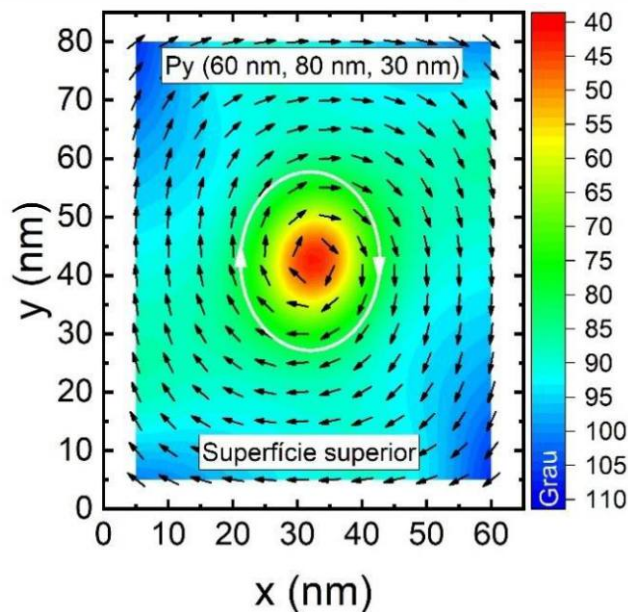
Figura 2. Curvas de magnetização dos nanoelementos retangulares de Fe e Py ($60\text{ nm} \times 80\text{ nm} \times 30\text{ nm}$), obtidas após a saturação em campo externo e subsequente redução até $H = 0$.



Fonte: Autor, 2025

Figura 3. Padrão de magnetização no plano da superfície superior de nanoelementos retangulares de Fe (painel esquerdo) e Py (painel direito), ambos com dimensões de $60\text{ nm} \times 80\text{ nm} \times 30\text{ nm}$, no estado de remanência.





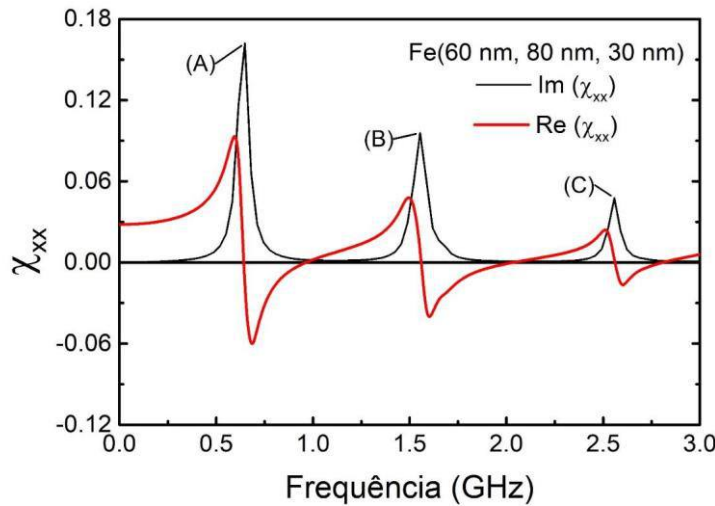
As setas pretas indicam a orientação local dos momentos magnéticos, enquanto a barra de cores representa o ângulo fora do plano. O círculo com setas brancas é utilizado apenas como guia visual para destacar a presença do vórtice magnético.

Fonte: Autores, (2025).

Para a obtenção do espectro de excitações no estado de remanência, foi aplicado um campo externo oscilante de baixa intensidade, com amplitude $h_0 = 10 \mu\text{T}$. O Cálculo das componentes do tensor de suscetibilidade dinâmica foi realizado a partir da Equação 8. A Figura 4 apresenta o espectro de excitações do nanoelemento de Fe (60 nm, 80 nm, 30 nm) para a $\chi_{xx} = \frac{\partial m_x}{\partial h_x}$. Nessa figura, a curva preta corresponde à parte imaginária e a curva vermelha à parte real de χ_{xx} , ambas no estado de remanência ilustrado na Figura 3 (painel esquerdo).

Nossos resultados mostram que no intervalo de micro-ondas de até 3 GHz, a componente χ_{xx} do nanoelemento retangular de Fe (60 nm, 80 nm, 30 nm) apresenta três picos de ressonância bem definidos na parte imaginária (curva preta), identificados nos pontos (A), (B) e (C) da figura 4, correspondentes às frequências de 0,65, 1,55 e 2,56 GHz, respectivamente. A análise da componente real χ_{xx} (curva vermelha) confirma essas ressonâncias, evidenciando inversões de sinal, positivo para negativo, exatamente nas mesmas frequências.

Figura 4: Componente $\chi_{xx} = \frac{\partial m_x}{\partial h_x}$ da susceptibilidade dinâmica de um nanoelemento de Fe (60 nm, 80 nm, 30 nm). Os picos mostram as frequências de ressonância nas frequências 0,65, 1,55 e 2,56 GHz.

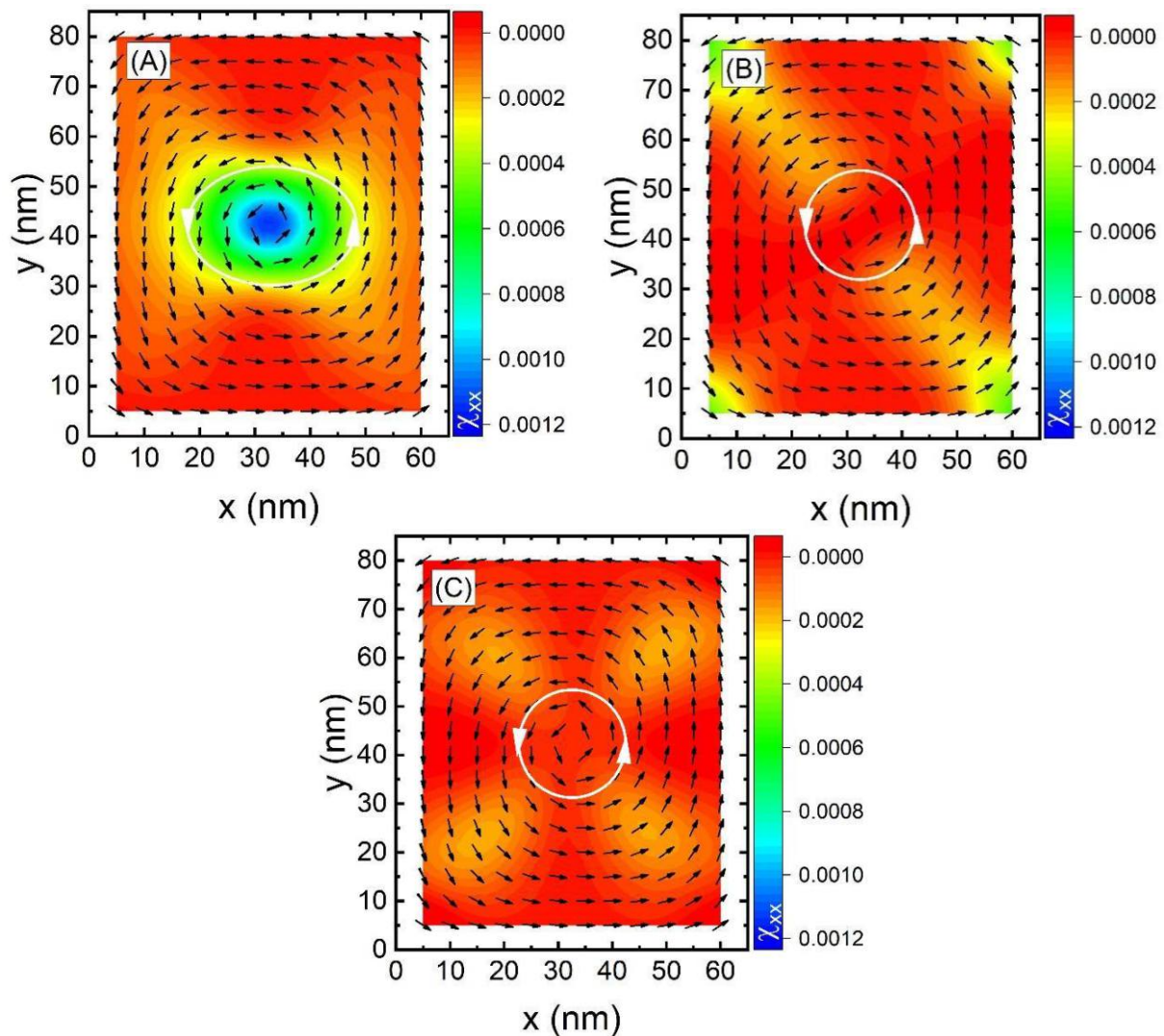


Fonte: Autor, 2025

Na Figura 5, é apresentada a distribuição espacial da componente χ_{xx} da susceptibilidade dinâmica para o nanoelemento retangular de Fe (60 nm, 80 nm, 30 nm), associada às frequências de 0,65, 1,55 e 2,56 GHz. Como não foram observadas diferenças significativas entre os padrões obtidos no plano da superfície e nos planos internos do nanoelemento, os resultados mostrados correspondem ao plano da superfície superior.

Nossos resultados indicam que, para esse tipo de nanoestrutura magnética, o modo de menor frequência é invariavelmente localizado na região do núcleo do vórtice magnético, em concordância com a teoria dos modos giromagnéticos. Na Figura 5(A), observa-se que, na frequência de 0,65 GHz, a resposta dinâmica está confinada ao núcleo do vórtice, característica típica do chamado modo de translação do vórtice (ou *gyrotropic mode*), no qual o núcleo executa um movimento oscilatório em torno de sua posição de equilíbrio (Guslienko *et al.*, 2002; Novosad *et al.*, 2005).

Figura 5. Distribuição espacial das amplitudes da componente X_{xx} da susceptibilidade dinâmica de um nanoelemento de Fe (60 nm, 80 nm, 30 nm) nas frequências de (A) 0,65 GHz, (B) 1,55 GHz e (C) 2,56 GHz, correspondentes aos picos (A), (B) e (C) indicados na figura 4. As setas pretas representam a orientação local dos momentos magnéticos, enquanto a barra de cores indica a intensidade local de X_{xx} . O círculo com setas brancas é apresentado apenas como guia visual para evidenciar a presença do vórtice magnético.



Fonte: Autores, (2025).

A região em verde, que evolui para azul, indica a máxima amplitude dessa oscilação, enquanto a região em vermelho não apresenta contribuição significativa, evidenciando que as excitações são essencialmente locais e não envolvem o restante do nanoelemento. Esse comportamento confirma que o modo fundamental

está associado exclusivamente à dinâmica do núcleo, sem excitação de modos de volume ou de borda.

Por outro lado, a Figura 5(B), correspondente ao segundo pico na frequência de 1,55 GHz, mostra que as contribuições para a resposta dinâmica se concentram nas bordas do nanoelemento, caracterizando um modo de borda (*edge mode*), em que as excitações são predominantemente confinadas às regiões próximas às fronteiras laterais.

Finalmente, a Figura 5(C), associada ao pico de maior frequência (2,56 GHz), evidencia um padrão típico de modo de volume (*bulk mode*), com máximas amplitudes distribuídas ao longo das diagonais do nanoelemento e mínima contribuição no núcleo do vórtice. Este comportamento indica que, em frequências mais altas, a excitação se estende para o interior da estrutura, envolvendo praticamente todo o volume magnético, em contraste com os modos de núcleo e de borda.

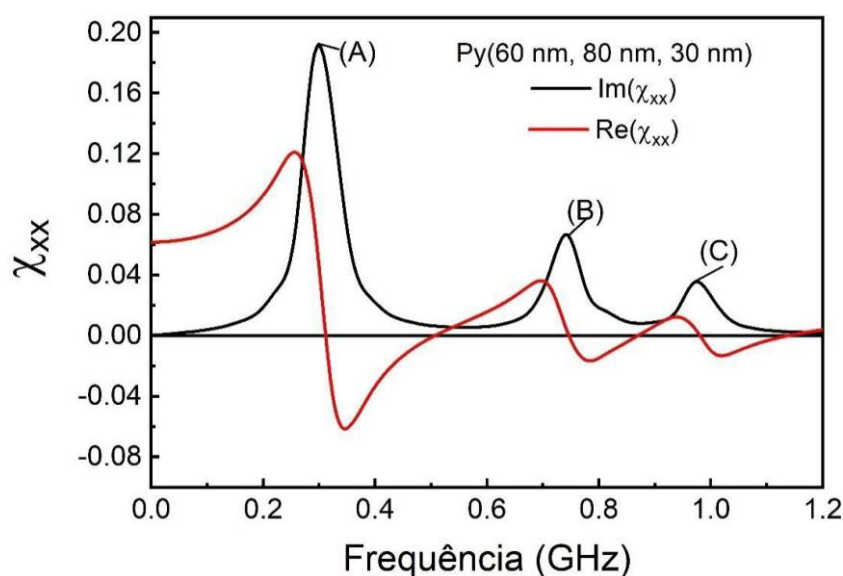
A Figura 6 apresenta a dinâmica do nanoelemento de Py (60 nm, 80 nm, 30 nm) por meio da componente X_{xx} do tensor de susceptibilidade dinâmica. Embora possua as mesmas dimensões físicas que o nanoelemento de Fe (ver Figura 4) observa-se que as frequências de ressonância do Py são sistematicamente menores, em consonância com suas propriedades intrínsecas. Especificamente, os três primeiros modos apresentam frequências de 0,29 GHz, 0,74 GHz e 0,97 GHz, respectivamente.

Os modos são representados simultaneamente pela parte imaginária (curva preta) e pela parte real (curva vermelha) de X_{xx} . Na parte imaginária, as frequências de ressonância aparecem como picos bem definidos, enquanto na parte real a ressonância é marcada pela inversão do sinal, de positivo para negativo, exatamente nas mesmas frequências. Esse comportamento é característico da resposta dispersiva de sistemas magnéticos, reforçando a coerência entre as duas representações.

A diferença quantitativa observada entre os espectros do Py e do Fe pode ser atribuída às propriedades intrínsecas dos materiais. O Py apresenta magnetização de saturação e constante de rigidez magnética menores que as do Fe,

o que leva a campos internos efetivos mais fracos e, consequentemente, a frequências de precessão reduzidas. Tal resultado está em pleno acordo com a teoria da dinâmica magnética, que prevê que modos de ressonância ocorrem em frequências mais baixas para materiais com menor magnetização de saturação, conforme descrito em modelos baseados na equação de Landau–Lifshitz–Gilbert.

Figura 6: Componente $\chi_{xx} = \frac{\partial m_x}{\partial h_x}$ da susceptibilidade dinâmica de um nanoelemento de Py (60 nm, 80 nm, 30 nm). Os picos mostram as frequências de ressonância nas frequências 0,29, 0,75 e 0,97 GHz.



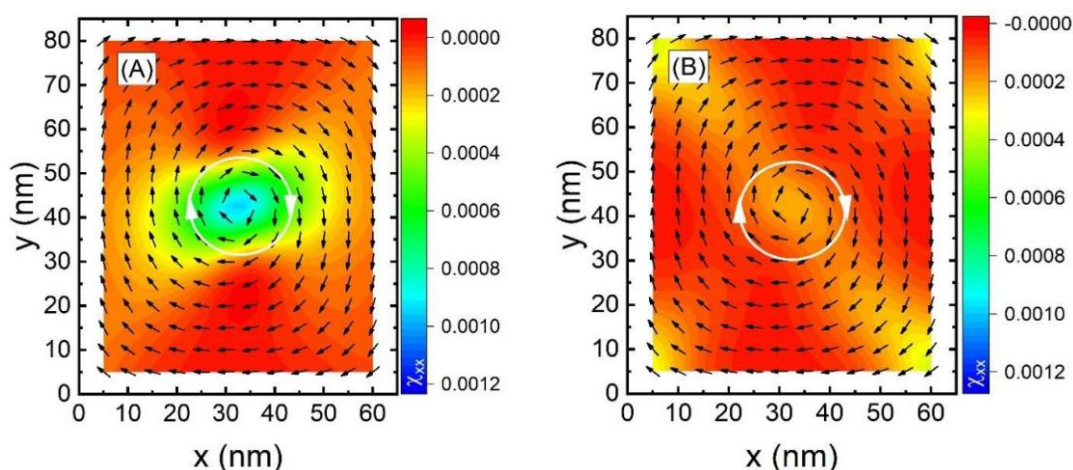
Fonte: Autores, (2025).

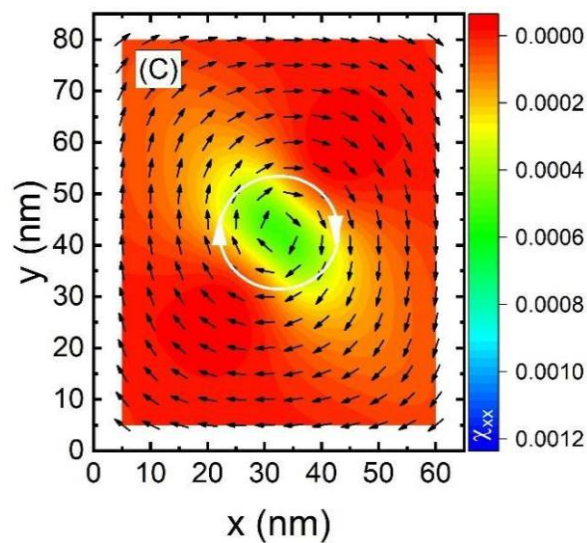
O espectro dinâmico do nanoelemento de Py (60 nm, 80 nm, 30 nm) apresenta as características típicas de sistemas com vórtices magnéticos, destacando-se que o modo de menor frequência está sempre localizado no núcleo do vórtice. Essa observação é corroborada pelos painéis de distribuição espacial das amplitudes da componente χ_{xx} da susceptibilidade dinâmica. Os resultados exibidos correspondem ao plano da superfície superior do nanoelemento; entretanto, as diferenças em relação aos planos internos são desprezíveis, indicando que o padrão de excitação é praticamente uniforme ao longo da espessura da estrutura.

A figura 7(A) ilustra a distribuição espacial das amplitudes de contribuição para a resposta dinâmica na frequência de 0,29 GHz. Observa-se que as principais contribuições se concentram nas regiões em verde e azul, correspondentes ao núcleo do vórtice, onde a intensidade de oscilação é máxima. Em contraste, as regiões em vermelho apresentam contribuição praticamente nula para a resposta nessa frequência, evidenciando que este é um modo fortemente localizado no núcleo do vórtice magnético.

Embora ocorra em frequência significativamente menor que a observada para o Fe (1,55 GHz), o segundo modo de ressonância do nanoelemento de Py, localizado em 0,74 GHz, apresenta um padrão espacial característico, conforme mostrado na figura 7(B). As principais contribuições concentram-se nas bordas do nanoelemento (regiões em amarelo), o que é típico de um modo de borda (*edge mode*). Entretanto, observa-se também a presença de contribuições ao longo das diagonais, incluindo a região central do vórtice (regiões em laranja), o que sugere que este não é um modo puramente localizado nas bordas, mas sim um modo híbrido (*edge-core hybrid mode*).

Figura 7. Distribuição espacial das amplitudes da componente X_{xx} da susceptibilidade dinâmica de um nanoelemento de Fe (60 nm, 80 nm, 30 nm) nas frequências de (A) 0,29 GHz, (B) 0,74 GHz e (C) 0,97 GHz, correspondentes aos picos (A), (B) e (C) indicados na figura 4. As setas pretas representam a orientação local dos momentos magnéticos, enquanto a barra de cores indica a intensidade local de X_{xx} . O círculo com setas brancas é apresentado apenas como guia visual para evidenciar a presença do vórtice magnético.





Fonte: Autores, (2025).

Por fim, o painel da Figura 7(C) apresenta as contribuições espaciais para a resposta dinâmica na frequência de 0,97 GHz. Observa-se que as amplitudes de oscilação estão novamente concentradas na região central do vórtice (região em verde), indicando um modo predominantemente localizado no núcleo.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, realizamos um estudo detalhado da dinâmica de vórtices magnéticos em nanoelementos retangulares de Fe e Py (60 nm, 80 nm, 30 nm), utilizando o cálculo da componente χ_{xx} do tensor de susceptibilidade dinâmica como principal ferramenta de análise. As simulações permitiram identificar e caracterizar os três primeiros modos ressonantes de cada material, confirmando a presença de um modo no núcleo do vórtice em baixa frequência, seguido por um modo de borda e, por fim, por um modo de volume em frequências mais elevadas.

A comparação direta entre os nanoelementos de Fe e Py revelou diferenças sistemáticas na resposta dinâmica: as frequências de ressonância do Py são consistentemente menores, fato atribuído à sua menor magnetização de saturação e à constante de rigidez reduzida. Essa diferença resulta em campos internos efetivos mais fracos e, conseqüentemente, em um poço de energia mais raso para o movimento dos momentos magnéticos na região do núcleo do vórtice, facilitando

oscilações em frequências mais baixas. Observou-se ainda maior hibridização modal no Py, com o segundo modo apresentando contribuições simultâneas de borda e núcleo \rightarrow um comportamento característico de materiais com baixa M_S .

Os resultados obtidos corroboram previsões teóricas e dados experimentais previamente reportados na literatura (Gusliencko *et al.*, 2002; Novosad *et al.*, 2005), reforçando a validade do modelo empregado e demonstrando que a sequência modal núcleo \rightarrow borda \rightarrow volume é robusta mesmo para nanoelementos de diferentes composições.

Do ponto de vista aplicado, o controle das frequências de ressonância por meio da escolha adequada do material e da geometria abre perspectivas para o projeto de dispositivos spintrônicos, nano-osciladores baseados em torque de spin e elementos para lógica magnonônica. Como trabalhos futuros, sugere-se investigar a influência de correntes de spin polarizado, da anisotropia de forma e da interação dipolar entre múltiplos nanoelementos, visando explorar fenômenos coletivos e aplicações em redes de osciladores acoplados.

REFERÊNCIAS

CHOE, S.-B.; ACREMANN, Y.; SCHOLL, A.; BAUER, A.; DORAN, A.; STÖHR, J.; PADMORE, H. A. Vortex core-driven magnetization dynamics. *Science*, v. 304, n. 5669, p. 420-422, 2004.

DANTAS, J. T. S. et al. Tailoring magnetic vortices of dipolar coupled nanoelements. *Journal of Applied Physics*, v. 128, n. 15, art. 153903, 2020. DOI: 10.1063/5.0020562.

DINIZ, F. V. S.; JALES, T. G. M.; OLIVEIRA, L. L.; MARTINS JR., S. M. B.; CARRIÇO, A. S.; DANTAS, A. L. The impact of spin-polarized current on the excitations of interface pinned domain walls. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, v. 594, p. 171903, 2024.

FERT, A. Nobel Lecture: origin, development, and future of spintronics. *Reviews of Modern Physics*, v. 80, p. 1517-1530, 2008.

GUSLIENKO, K. Y. Magnetic vortex state stability, reversal and dynamics in restricted geometries. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, v. 8, n. 6, p. 2745-2760, 2008.

GUSLIENKO, K. Y.; IVANOV, B. A.; NOVOSAD, V.; OTANI, Y.; SHIMA, H.; FUKAMICHI, K. Eigenfrequencies of vortex state excitations in magnetic submicron-size disks. *Journal of Applied Physics*, v. 91, p. 8037-8039, 2002.

JALES, T. G. M.; MARTINS Jr., S. M. B.; CARRIÇO, A. S.; DANTAS, A.L., Dynamic susceptibility of dipolar coupled magnetic vortices. *AIP Advances* 015242, 2024.

McMICHAEL, R. D.; DONAHUE, M. J. Head-to-head domain wall structures in thin magnetic strips. *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 33, n. 5, p. 4167-4169, 1997.

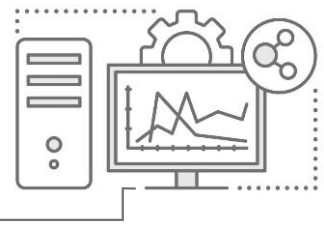
MORISH, A. H. *The Physical Principles of Magnetism*. [S.l.]: Editora R. E. Krieger Publishing Company, 1980.

NOVOSAD, V.; FRADIN, F. Y.; ROY, P. E.; BUCHANAN, K. S.; GUSLIENKO, K. YU.; BADER, S. D. Magnetic vortex resonance in patterned ferromagnetic dots. *Physical Review B*, v. 72, p. 024455, 2005.

SHINJO, T.; OKUNO, T.; HASSDORF, R.; SHIGETO, K.; ONO, T. Magnetic vortex core observation in circular dots of permalloy. *Science*, v. 289, n. 5481, p. 930-932, 2000.

WACHOWIAK, A.; WIEBE, J.; BODE, M.; PIETZSCH, O.; MORGENSTERN, M.; WIESENDANGER, R. Direct observation of internal spin structure of magnetic vortex cores. *Science*, v. 298, n. 5593, p. 577-580, 2002.

ZUTIC, I.; FABIAN, J.; DAS SARMA, S. Spintronics: fundamentals and applications. *Reviews of Modern Physics*, v. 76, p. 323-410, 2004.



CAPÍTULO 3

DOI: 10.63951/synapse978-65-88890-61-5_3

JANIELE ANDRADE BORGES¹
MARIA HELENA DE FREITAS¹

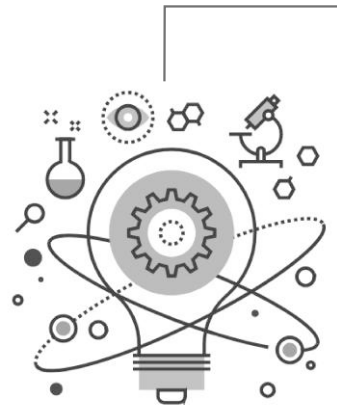
POTENCIAL DE CAPTAÇÃO E APROVEITAMENTO DA ÁGUA PLUVIAL PARA USO NÃO POTÁVEL EM EDIFICAÇÕES NA CIDADE DE NATAL/RN

Resumo

Embora abundante, os recursos hídricos são limitados e muitos países, incluindo o Brasil, enfrentam dificuldades de acesso à água potável, o que torna urgente a busca por alternativas que reduzam a escassez. Nesse contexto, o presente estudo tem como objetivo analisar indicadores relacionados ao potencial e às técnicas de captação e aproveitamento da água pluvial para fins não potáveis na cidade de Natal. Para isso, realizou-se uma pesquisa bibliográfica com caráter exploratório, utilizando bases de dados de universidades, revistas e programas de pós-graduação, a fim de reunir artigos, dissertações e monografias relevantes ao tema. Após a seleção, os materiais foram analisados para identificar métodos de captação e armazenamento da água da chuva. Os resultados evidenciam que, em Natal, alguns reservatórios encontram-se próximos do limite de utilização, somando-se ao problema da contaminação por nitrato em águas subterrâneas. Esse cenário reforça a necessidade de alternativas sustentáveis, entre as quais se destaca o aproveitamento da água pluvial. A adoção dessa prática apresenta potencial para reduzir a escassez hídrica e contribuir para a economia de água potável, mostrando-se uma solução viável para a região.

Palavras-chave: Escassez de água. Águas pluviais. Captação e Aproveitamento.

¹ Universidade do Estado do Rio Grande do Norte



Abstract

Although abundant, water resources are limited, and many countries, including Brazil, face difficulties in accessing drinking water, which makes the search for alternatives to reduce scarcity urgent. In this context, the present study aims to analyze indicators related to the potential and techniques of rainwater harvesting and use for non-potable purposes in the city of Natal. To this end, an exploratory bibliographic research was conducted, using databases from universities, journals, and graduate programs to gather relevant articles, dissertations, and monographs on the subject. After selection, the materials were analyzed to identify methods of rainwater collection and storage. The results show that, in Natal, some reservoirs are close to their utilization limits, in addition to the problem of nitrate contamination in groundwater. This scenario reinforces the need for sustainable alternatives, among which the use of rainwater stands out. The adoption of this practice has the potential to reduce water scarcity and contribute to the saving of drinking water, proving to be a viable solution for the region.

Keywords: *Water shortage; Rainwater; Collection and use.*



INTRODUÇÃO

A água é um recurso natural essencial à vida no planeta, mas apenas uma pequena fração está disponível para consumo humano. Essa parcela vem se tornando cada vez mais escassa em razão do crescimento populacional, desperdício, poluição e mudanças climáticas. Os recursos hídricos são limitados e, atualmente, diversos países enfrentam problemas relacionados à falta de água potável.

Fernandes, Neto e Mattos (2007) destacam que a busca por novas formas de captação tem se intensificado em decorrência da poluição das reservas de água doce e da iminência da escassez, ressaltando o aproveitamento da água da chuva como alternativa sustentável, limpa e de baixo custo. No contexto brasileiro, Martins (2013) aponta que o país possui um enorme potencial hídrico, tendo posse de cerca de um quinto da reserva mundial de água, mas, conforme Machado (2013), a distribuição desigual resulta em estresse hídrico em várias regiões. A esse cenário somam-se a diminuição das chuvas, o desperdício e a redução dos níveis das reservas, o que exige racionamento e alternativas de abastecimento

Em Natal, a situação é agravada pela falta de saneamento básico, o que vem afetando significativamente a qualidade da água e provocando grande impacto sobre a população e sobre o sistema produtivo e, pelo aumento dos níveis de nitrato nos aquíferos subterrâneos, inviabilizando o consumo em alguns pontos da cidade (Medeiros, 2001; Alves, 2009).

O aproveitamento da água pluvial surge, nesse contexto, como solução estratégica. O seu aproveitamento contribui para a diminuição do volume consumido de água tratada, gerando economia no sistema de tratamento e na conta de água do usuário (Hagemann, 2009). Além disso, o aproveitamento da água pluvial reduz os riscos de enchentes em locais cujos solos são altamente impermeabilizados (Fernandes; Neto; Mattos, 2007).

Diante das condições climáticas do estado do Rio Grande do Norte onde se convive constantemente com baixos e irregulares índices pluviométricos já é uma realidade o aproveitamento de água de chuva em sistemas domésticos e agrícolas em áreas rurais, representando hoje uma alternativa que tem contribuído, pelo menos, para a melhoria das condições de vida da população (Alves, 2010). No entanto, embora seja uma realidade em outros contextos do Brasil, o aproveitamento de águas pluviais em áreas urbanas na cidade de Natal parece algo ainda pouco debatido, o que mostra a importância de identificarmos se já se dispõe de estudos suficientes que forneçam informações válidas para a determinação de indicadores quanto à viabilidade técnica e econômica para as condições de nossa cidade.

Diante desse cenário, o presente estudo tem como objetivo levantar indicadores quanto ao potencial e às técnicas de aproveitamento da água pluvial em Natal para fins não potáveis. A pesquisa foi conduzida por meio de revisão bibliográfica



exploratória, conforme Lakatos e Marconi (2003), que consideram esse método uma ferramenta essencial para reunir e analisar trabalhos relevantes, fornecendo dados atualizados, evitando lacunas e erros, além de orientar novas investigações. Foram selecionados artigos, dissertações, monografias e livros, organizados e analisados para identificar técnicas de captação e armazenamento da água pluvial, bem como avaliar seu potencial diante das condições ambientais locais.

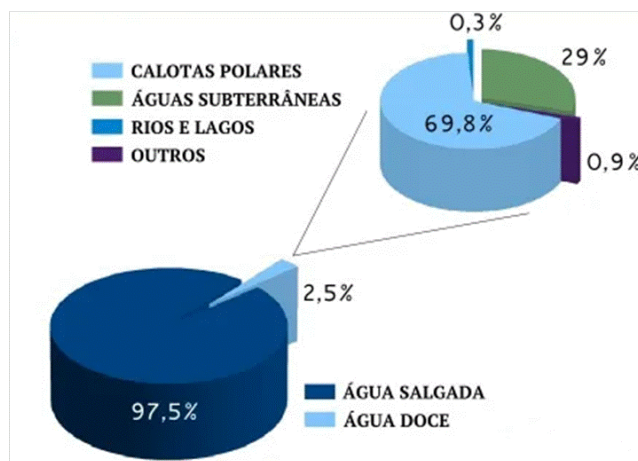
A estrutura deste trabalho está organizada em quatro seções: a primeira apresenta a introdução, objetivos, justificativa e metodologia; a segunda discute a disponibilidade de recursos hídricos mundial e nacional; a terceira analisa o potencial e as técnicas aplicáveis em Natal; e a última reúne as considerações finais, dificuldades enfrentadas e sugestões para pesquisas futuras.

2 DISPONIBILIDADE HÍDRICA E SISTEMAS DE CAPTAÇÃO E APROVEITAMENTO DE ÁGUAS PLUVIAIS

2.1 DISPONIBILIDADE DE RECURSOS HÍDRICOS NO MUNDO E NO BRASIL

A água é um elemento relativamente abundante no planeta, mas essa abundância gera a falsa percepção de que se trata de um recurso inesgotável. Estima-se que cerca de 97,5% da água existente no mundo seja salgada, restando apenas 2,5% de água doce; entretanto, aproximadamente 69% dessa fração encontra-se congelada nas calotas polares e regiões montanhosas, o que limita seu uso (Oliveira, 2008). Assim, menos de 1% da água doce dos continentes está diretamente acessível, correspondendo a apenas 0,007% do total disponível no planeta.

Figura 1 – Distribuição da água existente no mundo.



Fonte: PENA (2016).

Além disso, grande parte das águas superficiais encontra-se com qualidade comprometida devido à poluição e outras formas de degradação (Hagemann, 2009). Do montante acessível, cerca de 70% são destinados à agricultura, 22% à indústria e apenas 8% ao uso doméstico, revelando a forte pressão sobre esse recurso limitado (Lima, 2011). A Figura 1 exemplifica de forma gráfica a distribuição de água no mundo.

Embora a água esteja presente em grande quantidade no planeta, muitos países enfrentam sérios problemas de escassez. Dados da Organização das Nações Unidas (ONU), citados por Lima (2011), indicam que 20% da população mundial ainda não tem acesso à água potável. Esse cenário se deve, em grande parte, ao fato de que, no último século, o consumo de água cresceu a um ritmo duas vezes superior ao da população. A previsão é que, até 2025, cerca de dois terços da população mundial enfrentam dificuldades quanto à disponibilidade desse recurso.

A preocupação com a água não se resume a problemas em sua quantidade limitada, esse problema também se relaciona a sua má distribuição ao redor do mundo. Países como o Canadá possuem mais que o necessário de água, enquanto no oriente médio praticamente não existe (Lima, 2005 *apud* Lima 2011). Nesse contexto, o aproveitamento da água pluvial, que já é utilizado em muitas regiões do mundo, pode se tornar uma alternativa viável para minimizar o sério problema com a falta de água que muitos países enfrentam.

Como mencionado anteriormente, o Brasil é considerado um país extremamente rico em recursos hídricos, apresentando uma disponibilidade estimada em 34.000 m³/hab/ano (Lima, 2011). Apesar de deter aproximadamente 14% da água doce disponível no planeta, essa riqueza não se distribui de forma uniforme pelo território nacional. As regiões mais populosas são justamente aquelas com menor disponibilidade hídrica, enquanto as áreas com maior abundância de água concentram os menores índices populacionais (Marinoski, 2007).

2.2 APROVEITAMENTO DE ÁGUAS PLUVIAIS

A captação e o aproveitamento da água da chuva constituem práticas milenares, utilizadas por civilizações como os Astecas, Maias e Incas (Guimarães *et al.*, 2015). De acordo com Alves (2010), alguns dos registros mais antigos de reservatórios datam de 3600 a.C., em Israel, na fortaleza de Masada, que contava com dez reservatórios com capacidade total de 40 milhões de litros. Outro marco histórico é a Pedra Moabita, datada de 850 a.C. e encontrada no Oriente Médio, onde o rei Mesha dos Moabitas recomendava a construção de reservatórios em cada residência para o armazenamento da água da chuva (Tomaz, 2011).

Nosé (2008) destaca que a técnica de coleta e armazenamento da água pluvial sempre foi amplamente utilizada em diferentes regiões do mundo, sobretudo em áreas

áridas e semiáridas, que representam cerca de 30% da superfície terrestre. O aproveitamento da água da chuva para usos não potáveis já vem sendo desenvolvido por vários países, como Japão e Alemanha, além de Estados Unidos, Austrália e Singapura, que desenvolvem projetos voltados para essa prática (Tomaz, 2003).

Nesse contexto, a busca por sistemas que garantam o uso mais eficiente da água tem ganhado relevância, sendo os sistemas de aproveitamento de águas pluviais uma alternativa de destaque (Alves, 2010). Trata-se de uma solução simples e de baixo custo, cada vez mais adotada, sobretudo no Nordeste brasileiro, em função dos baixos índices pluviométricos. Além disso, em regiões com alta precipitação, esses sistemas podem contribuir para a mitigação de enchentes e inundações em grandes centros urbanos.

Assim, embora o aproveitamento da água da chuva tenha sido progressivamente substituído por outras tecnologias ao longo da história, a escassez hídrica atual tem resgatado sua importância, tornando essa prática essencial para complementar o abastecimento e atender à crescente demanda da população (Alves, 2010).

Na Alemanha, o aproveitamento da água da chuva tem sido aplicado em diferentes tipos de empreendimentos. Um exemplo é o centro comercial Alexa, do grupo Sonae Sierra, onde a água pluvial coletada é utilizada nos sistemas de refrigeração e de combate a incêndio. Já na clínica Bad Hersfeld, localizada em Hussen, a água da chuva é destinada às descargas sanitárias e ao sistema de refrigeração das máquinas, possibilitando inclusive o reaproveitamento do calor. Estima-se que, apenas nessa clínica, a economia alcance aproximadamente 6.180 m³ de água potável por ano (Alves, 2010).

O Japão é um dos países que mais utiliza sistemas de aproveitamento de água da chuva, é também exemplo quando se refere a tecnologias de aproveitamento da água pluvial. O governo japonês oferece em 16 cidades ajuda financeira para quem construir na sua residência um sistema de reservatório de água de chuva e ou sistemas de valas para infiltração (Cardoso, 2013).

Em Tóquio, a coleta de águas pluviais é amplamente utilizada devido à distância dos reservatórios de abastecimento em relação à capital japonesa. Um exemplo notável é o Estádio Tokyo Dome, construído para a Copa do Mundo de 2002, que incorpora um projeto arquitetônico inovador voltado para a captação da água da chuva. Sua cobertura, feita de plástico ultra resistente e inflável, funciona como uma grande lona, possibilitando uma área de captação de aproximadamente 16.000 m². A água recolhida é armazenada em uma cisterna subterrânea, onde passa por tratamento antes de ser utilizada no sistema de combate a incêndios, além de suprir cerca de um terço do consumo total de água do estádio (Silveira, 2008, *apud* Reis; Silva, 2014).

Em Sumida, cidade metropolitana de Tóquio no Japão, a precipitação média anual é de 1400 mm e mesmo assim a água de chuva é aproveitada devido a segurança no abastecimento de água em caso de emergência (Tomaz, 2011).

No deserto de Karoo, na África do Sul, onde as fontes de água subterrânea estão localizadas a grandes profundidades e apresentam, muitas vezes, baixa qualidade, o aproveitamento da água da chuva surge como uma solução eficiente para complementar o abastecimento hídrico (Hagemann, 2009). Em Moçambique, a disponibilidade de água superficial é limitada e mal distribuída, tornando a captação de águas pluviais uma técnica tradicional ainda amplamente utilizada, especialmente nas províncias centrais de clima mais árido (Hagemann, 2009).

Na Austrália, o aproveitamento da água da chuva também possui longa tradição, motivado pelos prolongados períodos de seca e pela alta demanda por água. Um exemplo é o complexo residencial Star City, com 1.300 apartamentos, localizado em Seoul, que possui três tanques de armazenamento com capacidade total de 3.000 m³. Parte da água captada é destinada a usos não potáveis, como sanitários e irrigação de jardins, enquanto outra parcela é reservada para situações de emergência (Alves, 2010).

No Brasil, o primeiro registro de aproveitamento de água da chuva foi implementado pelo exército norte-americano em Fernando de Noronha, em 1943, ainda em operação atualmente (Melo, 2007). Apesar de não ser amplamente difundido, a prática já é adotada em alguns empreendimentos, como o estádio João Havelange e o aeroporto Santos Dumont, no Rio de Janeiro, que utilizam a água pluvial para sistemas de refrigeração e descargas sanitárias, com captação média de 953 m³ e 1.085 m³ por mês, respectivamente (Alves, 2010).

No Nordeste, a captação de água da chuva é especialmente relevante devido à escassez hídrica e à salinidade das águas subterrâneas. A água pluvial é utilizada para consumo doméstico e atividades agrícolas, sendo uma alternativa essencial frente às secas prolongadas (Alves, 2010; Andrade, 2014). Programas de incentivo, como o Programa Um Milhão de Cisternas (P1MC), criado pela Articulação do Semi-Árido (ASA) em 2001, já beneficiaram milhões de pessoas na região, recebendo reconhecimento da Organização das Nações Unidas (Martins, 2013).

2.3 SISTEMAS DE CAPTAÇÃO E APROVEITAMENTO DE ÁGUAS PLUVIAIS

Os sistemas de captação e aproveitamento da água da chuva de modo geral são compostos por uma área de captação, calhas e condutores, grades ou filtros, e um reservatório para armazenamento da água. Entretanto, existe uma direta relação de interdependência e adequabilidade tecnológica entre o elemento para captação e os outros componentes do sistema (Mano, 2004).

Os sistemas de captação e aproveitamento da água da chuva são, em geral, constituídos por uma área de captação, calhas e condutores, grades ou filtros, e um reservatório para armazenamento da água. Existe, contudo, uma relação de interdependência entre a área de captação e os demais componentes do sistema, sendo necessária a adequação tecnológica entre eles (Mano, 2004).

A área de captação é considerada um dos elementos mais importantes do sistema, pois determina a quantidade de água pluvial que pode ser aproveitada em uma edificação e é o primeiro ponto de contato da chuva, estando suscetível à presença de poluentes de diferentes origens, como poluentes atmosféricos, folhas, galhos e excrementos de pequenos animais (Lopes, 2012). Essa área pode ser composta por telhados inclinados, pouco inclinados ou planos, dependendo das características da edificação e do projeto de captação (Tomaz, 2003).

A manutenção adequada dos sistemas de captação e aproveitamento da água da chuva é essencial para seu bom funcionamento e durabilidade. Recomenda-se que os telhados sejam limpos pelo menos duas vezes ao ano, preferencialmente durante períodos de menor ocorrência de chuvas, e que as árvores próximas sejam podadas, reduzindo a deposição de folhas e impedindo o acesso de animais que possam aumentar a quantidade de detritos (Bertolo, 2006).

As calhas e condutores constituem outro componente fundamental do sistema, sendo responsáveis pelo transporte da água desde o ponto de coleta até o reservatório. Esses elementos devem ser fabricados com materiais resistentes à corrosão e de longa durabilidade, como PVC, alumínio ou chapas galvanizadas, garantindo superfície lisa para evitar acúmulo de resíduos (Lopes, 2012; Tomaz, 2003).

As grades ou filtros têm a função de remover sedimentos e detritos de pequenas dimensões antes do armazenamento, prevenindo condições favoráveis ao desenvolvimento de microrganismos e algas (Alves, 2010). É necessário realizar a limpeza periódica desses filtros para evitar bloqueios causados por folhas, galhos e pequenos animais, que podem comprometer tanto a qualidade da água quanto o funcionamento do sistema (Hagemann, 2009).

Após a filtragem, a água é conduzida para o reservatório, que serve para reter e armazenar a água captada, protegendo-a da luz e do calor. Este componente representa o investimento mais significativo no sistema de aproveitamento da água da chuva, exigindo decisões sobre localização, capacidade e material, podendo ser instalado no solo ou enterrado. Os materiais mais comuns incluem concreto, alvenaria, ferro-cimento, metal galvanizado, fibra de vidro e polipropileno (Bertolo, 2006; Hagemann, 2009; Oliveira; Christmann; Pierezan, 2014).

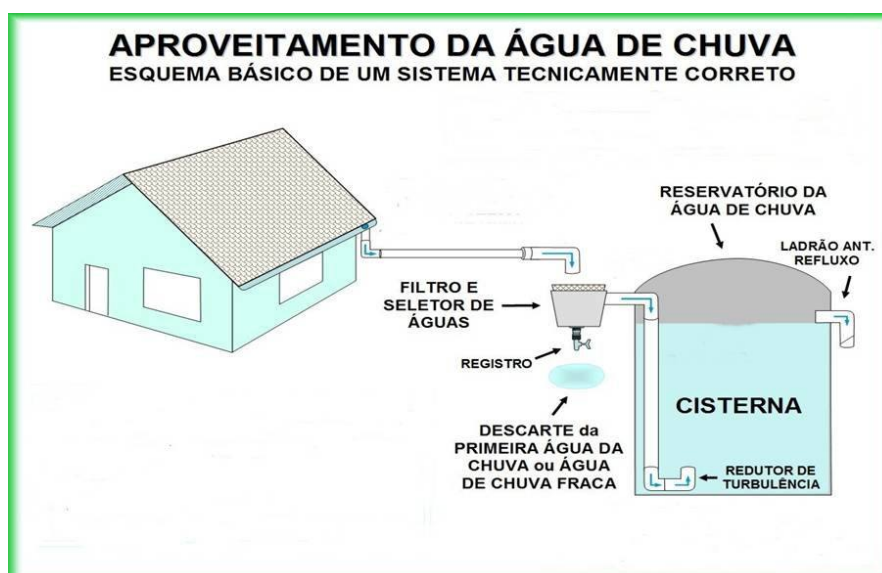
Para a concepção eficiente do sistema, é fundamental dimensionar adequadamente a área de captação e o reservatório, garantindo viabilidade técnica e econômica, além de otimizar o uso de recursos locais. Todos os componentes devem atender às normas da ABNT (NBR 15527/2007), que regulamenta o aproveitamento de água pluvial de coberturas urbanas para fins não potáveis (Lage, 2010). A viabilidade da implantação de um sistema depende de fatores como precipitação, área de captação, demanda de água, condições ambientais, finalidade e usos da água, sendo importante que as soluções técnicas não sejam uniformizadas, mas adaptadas às condições específicas de cada local (Reis; Silva, 2014).

Os sistemas de captação de água da chuva podem variar desde soluções simples até sistemas mais sofisticados e complexos. Neste estudo, será apresentado apenas o esquema de um sistema simples.

Esses sistemas básicos consistem na coleta da água pelo telhado, que é conduzida por calhas e condutores verticais até um filtro e, em seguida, direcionada para um reservatório de armazenamento. A água captada pode ser utilizada em atividades que não exigem tratamento, como lavagem de veículos e pátios, descargas sanitárias e irrigação de jardins.

A Figura 2 apresenta o esquema simplificado do sistema de captação de água de chuva.

Figura 2 – Esquema simplificado de um sistema de captação da água da chuva



Fonte: Adaptado de Sempre sustentável (2014).

Neste modelo, é usada uma peneira com malha fina para barrar as sujeiras maiores, depois a água vai para um recipiente de autolimpeza com um registro instalado no fundo e um tubo na lateral conectado com a cisterna. O registro deverá ficar um pouquinho aberto para descartar as primeiras águas da chuva, que são águas que carregam as sujeiras do telhado, como folhas, galhos e pequenos insetos. Depois de algum tempo de chuva, esse recipiente vai estar cheio e vai começar a transbordar a água da chuva para dentro da cisterna através do tubo lateral (Sempre Sustentável, 2014).

A técnica de captação e armazenamento de água da chuva é utilizada principalmente em cisternas, em especial nas zonas rurais do nordeste brasileiro para consumo humano, como fonte de suprimento de água. Essa tecnologia é bem simples, fácil de executar, apresenta baixo custo, não requer mão de obra especializada, sendo assimilada facilmente pelos próprios membros da família contemplada (Guilherme, 2006).

3 METODOLOGIA

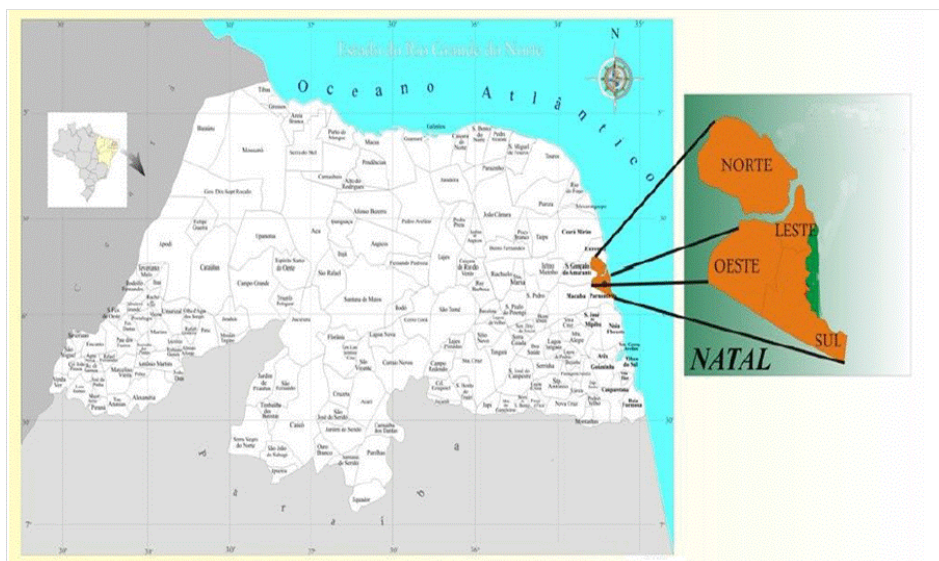
A metodologia adotada neste estudo consistiu inicialmente em um levantamento bibliográfico preliminar, com a seleção de materiais relevantes, incluindo artigos acadêmicos, livros, dissertações e monografias, relacionados ao tema da pesquisa. A partir das fontes selecionadas, foi realizada a compilação e análise do conteúdo, considerando os objetivos específicos do estudo, com foco na identificação das técnicas mais utilizadas para a captação e armazenamento da água pluvial, bem como na avaliação do potencial de aproveitamento da água da chuva nas condições ambientais da cidade de Natal.

Com base na análise crítica das fontes bibliográficas, procedeu-se à elaboração da monografia, integrando o conhecimento adquirido durante as leituras e interpretações dos materiais estudados. Dessa forma, a pesquisa buscou, por meio do estudo de referências técnicas e científicas disponíveis, informações capazes de subsidiar a definição de indicadores e parâmetros para avaliar a viabilidade da implantação de sistemas de aproveitamento de água pluvial, assim como seu potencial na cidade de Natal.

3.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo compreende a cidade de Natal, capital do Rio Grande do Norte, situada na região nordeste do Brasil, como mostra a Figura 3. Está incluída na Bacia Sedimentar Costeira Pernambuco-Paraíba-Rio Grande do Norte, mais precisamente entre as latitudes $5^{\circ} 43' S$ e entre as longitudes $35^{\circ} 09' W$ e $35^{\circ} 17' W$ e possui altitudes médias de quarenta metros acima do nível do mar (Alves, 2009).

Figura 3 – Localização da cidade de Natal/RN



Fonte: Adaptado de Alves (2009).

A cidade de Natal é dividida em quatro zonas: Norte, Leste, Oeste e Sul, possuindo uma população de 803.739 habitantes, uma área territorial de 167,263 km² e densidade demográfica de 4.805,24 hab/km² (IBGE, 2010). Segundo Alves (2009), a temperatura média anual da cidade é de aproximadamente 25,4 °C, com média das máximas mensais de 30,3 °C e das mínimas de 24,1 °C, apresentando uma amplitude térmica média de 6,2 °C, o que indica uma uniformidade térmica relativamente maior em comparação a outras capitais.

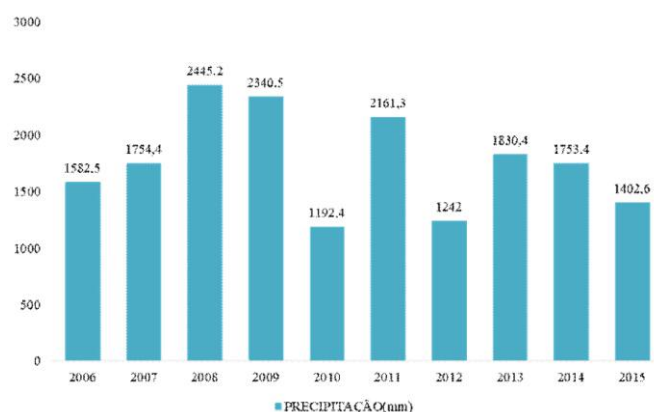
A insolação média anual atinge cerca de 2.986 horas, enquanto a umidade relativa do ar apresenta média anual de 77%, com os meses mais úmidos entre fevereiro e agosto e os menos úmidos de setembro a janeiro (Alves, 2009). A vegetação do município reflete as feições morfológicas da região, abrangendo campos dunares, mangues e praias, inserindo-se no domínio da Mata Atlântica. A cidade ainda apresenta ecossistemas de manguezal e formação vegetal de tabuleiro litorâneo, com características semelhantes às do cerrado brasileiro (Alves, 2009).

Natal apresenta elevada heterogeneidade espacial e temporal em seu regime pluviométrico, o que resulta em anos com precipitação acima da média e anos com déficit hídrico significativo (Medeiros, 2001). O clima da cidade é classificado como As, caracterizado como tropical quente e úmido, com verão seco e inverno relativamente chuvoso.

A precipitação média anual registrada no município de Natal no período de 2006 – 2015 foi de 1770,47 mm. Neste período, a menor precipitação anual ocorreu no ano de 2010, quando foram registrados apenas 1192,4 mm, enquanto a maior precipitação se deu no ano de 2008, com valores de 2.445,2 mm. A estação chuvosa compreende os meses de março a agosto, e de setembro a dezembro têm-se os meses com menor índice pluviométrico.

A Figura 4 apresenta a precipitação anual dos últimos 10 anos na cidade de Natal, de acordo com dados da Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte – EMPARN.

Figura 4 – Precipitação anual no período de 2006 a 2015 no município de Natal/RN



Fonte: EMPARN, 2015.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 DISPONIBILIDADE DA ÁGUA DOS MANANCIAIS E SITUAÇÃO ATUAL DE ABASTECIMENTO NA CIDADE DE NATAL

O município de Natal apresentou nos últimos anos uma crescente expansão urbana e consequentemente deficiências na infraestrutura da cidade, atrelado ao descaso em relação ao meio físico, proporcionando o aparecimento de graves problemas associado ao meio ambiente e às condições de vida populacional, principalmente a população mais carente. (Medeiros, 2001). Isto se reflete na poluição dos recursos hídricos superficiais que drenam o território municipal, tais como rios, riachos e lagoas, bem como, manancial subterrâneo de grande potencial hídrico, utilizados para o abastecimento de água de mais de 60% da população de Natal (PMN/RN, 2015).

De acordo com plano municipal de saneamento básico do município de Natal, os mananciais superficiais atualmente disponíveis na região metropolitana de Natal, utilizados como fonte de água para consumo humano são: o rio Pitimbu, a lagoa do Jiqui, que é responsável por 30% do abastecimento de água potável na cidade e a lagoa de Extremoz. Ainda conforme o plano municipal de saneamento básico do município de Natal, os mananciais superficiais encontram-se atualmente nos limites de suas capacidades de utilização, sendo necessário prever em curto prazo a possibilidade de novos mananciais. (PMN/RN, 2015).

Já nos mananciais subterrâneos, o grande desafio que a Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte (CAERN) enfrenta é com os constantes aumentos de contaminação por nitrato em poços, principalmente no abastecimento da zona Norte de Natal. Porém, a zona Sul também enfrenta esse problema de contaminação por nitrato, fazendo com que a água fique imprópria para consumo (PMN/RN, 2015).

De acordo com informações da CAERN (2014), citadas pelo PMN/RN (2015), a cidade possui um total de 206 poços, sendo 153 na Zona Sul e 53 na Zona Norte. Entretanto, devido à contaminação por nitrato acima do limite estabelecido pelo Ministério da Saúde (10 mg/L), 50 poços da Zona Sul foram desativados, correspondendo a 35,85% dos poços da região. Na Zona Norte, 19 poços encontram-se desativados, sendo 10 devido à contaminação por nitrato e os demais por problemas operacionais.

No material analisado referente ao Plano municipal de saneamento básico do município de Natal, são referenciados os sistemas de abastecimentos Natal Norte e Sul, segmentados pelo Rio Potengi, indicando a disponibilidade hídrica atual e as demandas dos respectivos sistemas (Tabela 1 e Tabela 2).

Tabela 1 - Disponibilidade hídrica atual e demandas projetadas no Sistema Natal Norte

Ano	Disponibilidade (m ³ /s)			Demanda média (m ³ /s)	Balanço (m ³ /s)
	Superficial	Subterrânea	Total		
2010	0,60	0,55	1,15	1,01	0,14
2015	0,60	0,55	1,15	0,83	0,32
2020	0,60	0,55	1,15	0,86	0,29
2030	0,60	0,55	1,15	1,09	0,06

Fonte: PDAAN, 2010 apud PMN/RN (2015).

Tabela 2 - Disponibilidade hídrica atual e demandas projetadas no Sistema Natal Sul

Ano	Disponibilidade (m ³ /s)			Demanda média (m ³ /s)	Balanço (m ³ /s)
	Superficial	Subterrânea	Total		
2010	0,60	2,40	3,00	1,68	1,32
2015	0,60	2,40	3,00	1,68	1,32
2020	0,60	2,40	3,00	1,75	1,25
2030	0,60	2,40	3,00	1,94	1,06

Fonte: PDAAN, 2010 apud PMN/RN (2015).

Considerando a crescente demanda por água potável, observa-se que o Sistema Natal Sul depende fortemente das águas subterrâneas, responsáveis por aproximadamente 80% de sua disponibilidade hídrica total. Esse cenário é preocupante, uma vez que mais da metade dessa produção tem origem em poços localizados em áreas urbanizadas, sujeitos a processos de contaminação (PMN/RN, 2015).

Diante dessa realidade, o principal desafio dos gestores locais consiste em garantir que a qualidade da água, tanto superficial quanto subterrânea, permaneça dentro dos padrões adequados para o consumo humano, sobretudo porque os recursos hídricos da cidade estão inseridos em zonas de elevada vulnerabilidade à contaminação. Nesse contexto, torna-se imprescindível a adoção de novas estratégias de captação e aproveitamento da água. O uso da água pluvial para finalidades que não exigem elevado grau de tratamento, como lavagem de pisos, calçadas e veículos, além do acionamento de descargas sanitárias, pode representar uma alternativa viável, contribuindo para significativa economia de água potável e preservação desse recurso essencial ao abastecimento humano

4.2 ESTUDOS SOBRE A VIABILIDADE DO APROVEITAMENTO DE ÁGUAS PLUVIAIS NA CIDADE DE NATAL

No Município de Natal, não foi identificada legislação específica que regulamente o aproveitamento da água da chuva em empreendimentos. A única lei encontrada sobre a utilização da água pluvial é a de nº 6502, de 20 de novembro de 2014, na qual explicita que a prefeitura do município do Natal fica autorizada a utilizar águas pluviais das lagoas de captação da cidade do Natal para fins de regar as gramas e plantas dos canteiros da cidade das vias públicas (Natal, 2014).

Apesar da ausência de regulamentação, algumas pesquisas vêm sendo desenvolvidas por instituições locais, como o Laboratório de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (LARHISA), da UFRN, e o IFRN – Campus Natal Central, com o objetivo de avaliar a viabilidade econômica do aproveitamento de águas pluviais. Estudos realizados no IFRN apontam que a adoção desse tipo de sistema é especialmente viável em edificações de grande porte, como escolas, em razão dos benefícios associados à redução da sobrecarga na rede pública de abastecimento, à diminuição dos riscos de alagamentos e processos erosivos, além de representar economia em relação ao consumo de água da concessionária (Oliveira; Maia; Costa, 2015). Os autores destacam que, embora seja necessário um investimento inicial, o retorno econômico pode ocorrer a médio prazo, tornando o sistema uma alternativa relevante tanto sob a perspectiva social quanto ambiental.

Resultados semelhantes foram obtidos em pesquisas conduzidas pelo LARHISA/UFRN, que também identificaram viabilidade econômica na implantação de sistemas de aproveitamento de água da chuva quando comparados aos custos do abastecimento público, além de benefícios associados à mitigação de enchentes e inundações em áreas urbanas (Fernandes; Neto; Mattos, 2007).

De acordo com Reis e Silva (2014), a viabilidade da implantação de tais sistemas depende de fatores como índices de precipitação, área de captação e demanda hídrica, além de considerar aspectos ambientais, climáticos, econômicos e o uso final da água. Belo e Nascimento (2010) acrescentam que a determinação do retorno financeiro requer cálculos específicos, que envolvem a estimativa do consumo, a análise da viabilidade técnica do sistema e a economia gerada pelo uso da água pluvial. Pêgo e Erthal Júnior (2012) reforçam que, para ser considerado viável, o investimento deve apresentar retorno em um período máximo de vinte anos.

O sistema de captação e aproveitamento de águas pluviais, portanto, se apresenta como uma alternativa técnica e economicamente viável em diversas condições ambientais, trazendo benefícios tanto para atividades cotidianas quanto para a economia no consumo de água, ao mesmo tempo em que contribui para enfrentar a escassez hídrica e reduzir problemas de alagamentos urbanos.

No contexto de Natal, que apresenta precipitação média anual de aproximadamente 1.100 mm, crescimento populacional contínuo e indícios de contaminação de corpos hídricos, o aproveitamento da água da chuva surge como estratégia promissora. Essa prática pode auxiliar na preservação dos aquíferos subterrâneos e no uso racional da água potável, além de contribuir para a manutenção do ciclo hidrológico local (PMN/RN, 2015).

Para tanto, é fundamental avançar em estudos que consolidem padrões técnicos de implantação adaptados às realidades sociais e ambientais da cidade, assim como desenvolver legislações que incentivem essa prática. Medidas como dedução no IPTU, revisão das tarifas de água e esgoto e estímulos econômicos específicos poderiam favorecer a adoção de sistemas de captação, reduzindo o desperdício e o uso excessivo dos recursos hídricos disponíveis.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante da crescente escassez de água de boa qualidade enfrentada por diversos países, o aproveitamento de águas pluviais se apresenta como uma alternativa promissora do ponto de vista do desenvolvimento sustentável, possibilitando a economia de água potável, especialmente em regiões com déficit hídrico, como o semiárido brasileiro, e em locais sujeitos a secas frequentes.

Além disso, áreas com elevados índices pluviométricos também podem se beneficiar do aproveitamento da água da chuva, contribuindo para a redução de enchentes e inundações em centros urbanos. Nessas situações, a água que antes escoava sem utilização pode ser captada, armazenada e utilizada em fins não potáveis, como descargas sanitárias, irrigação de jardins e limpeza de pisos e calçadas.

No Brasil, o aproveitamento da água pluvial ainda é pouco difundido, possivelmente devido à alta disponibilidade hídrica em grande parte do território e à ausência de políticas públicas que incentivem sua adoção. Observa-se, entretanto, que a cidade de Natal apresenta potencial significativo para a implantação desses sistemas, com precipitação média anual superior a 1.100 mm. A situação se torna ainda mais relevante diante do fato de que alguns reservatórios da cidade operam próximos da capacidade máxima e que há problemas de contaminação por nitratos nas águas subterrâneas.

Portanto, torna-se cada vez mais importante explorar novas formas de captação de água, sendo o aproveitamento da água da chuva uma alternativa viável para reduzir a escassez e economizar água potável. Recomenda-se a realização de estudos adicionais sobre o tema, abordando tanto a viabilidade de sistemas simples quanto de sistemas mais complexos, especialmente considerando o contexto ambiental de Natal, onde a literatura sobre o assunto ainda é escassa.

REFERÊNCIAS

ALVES, A. E. L. Monitoramento da qualidade das águas de chuvas conforme a atuação dos sistemas sinóticos na cidade de Natal/RN. 2009. 115 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geografia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal/RN, 2009.

ALVES, R. V. R. Uso eficiente da água em edifícios: Tecnologia, certificação, incentivos econômicos. 2010. 183 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto/Portugal, 2010.

ANDRADE, L. R. A influência do regime pluviométrico no desempenho de sistemas de aproveitamento de água de chuva. 2014. 33 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Sanitária, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.

BERTOLO, E. de J. P. Aproveitamento da água da chuva em edificações. 2006. 174 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Ambiental (tratamento de água e águas Residuais), Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2006.

CARDOSO, C. E. N. Aproveitamento de água de chuva para fins não potáveis. 2013. 74 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2013.

EMPARN. Acumulado de chuva 2006-2015. Disponível em: <http://189.124.135.176/monitoramento/monitoramento.php>. Acesso em: 10 de maio 2016.

FERNANDES, D. R. M.; NETO, V. B. de M.; MATTOS, K. M. da C. Viabilidade econômica do uso da água da chuva: Um estudo de caso da implantação de cisternas na UFRN/RN. XXVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Foz do Iguaçu/PR, 2007.

GUILHERME, L. de B. Aproveitamento das águas de chuva da cidade de Natal para fins potáveis. 2006. 141 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Sanitária, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2006.

GUIMARÃES, et al. Captação e aproveitamento da água da chuva para fins não potáveis e potáveis. Enciclopédia Biosfera, centro científico conhecer, Goiânia, v.11, n.21, 2015.

HAGEMANN, S. E. Avaliação da qualidade da água da chuva e da viabilidade de sua captação e uso. 2009. 140 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria/RS, 2009.

IBGE 2010. Disponível em: <http://www.cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?lang=&codmun=240810&search=rio-grand-e-do-norte|natal>. Acesso em: 16 de abril 2016.

LAGE, E. S. Aproveitamento de água pluvial em concessionárias de veículos na cidade de Belo Horizonte: potencial de economia de água potável e estudo de viabilidade econômica. 2010. 181 f. Dissertação (mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

LAKATOS, E. M; MARCONI, M. de A. Fundamentos de metodologia científica. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2003.

LIMA, F. A. de. Sistema automatizado para o aproveitamento de água cinza e azul, com controle de PH utilizando lógica fuzzy. 2011, 58f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal/RN, 2011.



LOPES, G. B. Estudo de viabilidade técnica do aproveitamento de água de chuva para fins não potáveis na Universidade Federal de Uberlândia. 2012. 189 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia/MG, 2012.

MACHADO, R. P. Análise da viabilidade Ambiental e Econômica da Implantação de Dispositivos de Aproveitamento de Águas Pluviais: Estudo de Caso: Região estendida da Bacia do Córrego Santa Terezinha (São Bernardo do Campo/SP). 2013. 124 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Ambiental e Urbana, Universidade Federal do ABC, Santos - SP, 2013.

MARINOSKI, A. K. Aproveitamento de água pluvial para fins não potáveis em instituição de ensino: estudo de caso em Florianópolis - SC. 2007. 107 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

MARTINS, B. de M. Aproveitamento de água da chuva para usos não potáveis em Brasília - DF: Aspectos Políticos e ambientais. 2013. 65 f. TCC (Graduação) - Curso de Gestão Ambiental, Faculdade UnB Planaltina, Planaltina - DF, 2013.

MANO, R. S. A captação residencial de água da chuva para fins não potável em Porto Alegre: Aspectos básicos da viabilidade e benefícios do sistema. 2004. 175 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

MEDEIROS, T. H. de L. Evolução Geomorfológica, (des)caracterização e formas de uso das lagoas da cidade do Natal-RN. 2001. 100 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geodinâmica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal/RN, 2001.

MELO, L. R. da C. Variação da qualidade da água de chuva no início da precipitação. 2007. 95 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Sanitária, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2007.

NATAL. Lei nº 6502/2014. Disponível em: <https://leismunicipais.com.br/a/rn/n/natal/lei-ordinaria/2014/651/6502/lei-ordinaria-n-6502-2014-fica-a-prefeitura-do-municipio-do-natal-autorizada-a-utilizar-o-uso-das-aguas-pluviais-das-lagoas-de-captacao-da-cidade-do-natal-para-fins-de-regar-as-gramas-e-plantas-dos-canteiros-da-cidade-do-natal-e-da-outras-providencias>. Acesso em: 18 de abr 2016.

NOSÉ, D. Aproveitamento de águas pluviais e reúso de águas cinzas em condomínios residenciais. 2008. 120 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Anhembi Morumbi, São Paulo, 2008.

OLIVEIRA, A. T. de F.; MAIA, Y. M.; COSTA, L. F. da. Estudo da viabilidade do aproveitamento de águas pluviais no IFRN Campus Natal-Central. Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia CONTECC. Fortaleza/CE, 2015.

OLIVEIRA, T. D. de; CHRISTMANN, S. S.; PIEREZAN, J. B. Aproveitamento, captação e (re) uso das águas pluviais na arquitetura. Revista Gestão e Desenvolvimento em Contexto - GEDECON – IV Fórum de Sustentabilidade. Universidade de Cruz Alta – UNICRUZ. v. 2, n. 2, 2014.

OLIVEIRA, N. N. de. Aproveitamento de água de chuva de cobertura para fins não potáveis de próprios da educação da rede municipal de Guarulhos. 2008. 80 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de Guarulhos, Guarulhos, 2008.

PENA, R. F. A. Distribuição da água pelo mundo. Disponível em: <http://alunosonline.uol.com.br/geografia/distribuicao-agua-pelo-mundo.html>. Acesso em: 16 de maio 2016.

PÊGO, C. S.; ERTHAL JÚNIOR, M. Dimensionamento e viabilidade econômica da coleta e uso de águas pluviais no município de Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro. *Perspectivas Online: Ciências Exatas e Engenharia*. Campos dos Goytacazes, 2 (3), 41-53, 2012. Disponível em: <http://www.seer.perspectivasonline.com.br/index.php/EE/article/viewFile/135/83>. Acesso em: 16 de maio 2016.

PMN/RN. Plano municipal de saneamento básico do município de Natal/RN. Natal/RN, abril, 2015. Disponível em: <http://www.natal.rn.gov.br>. Acesso em: 25 abril 2016.

REIS E SILVA, D. F. e. Aproveitamento de água de chuva através de um sistema de coleta com cobertura verde: Avaliação da qualidade da água drenada e potencial de economia de água potável. 2014. 100 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

SEMPRE SUSTENTÁVEL. Projeto experimental de aproveitamento de água da chuva com a tecnologia da minicisterna para residência urbana: Manual de construção e instalação. Versão 1.2 (dez 2014). Disponível em: <http://www.sempresustentavel.com.br/hidrica/minicisterna/minicisterna.htm>. Acesso em: 03 de maio 2016.

TOMAZ, P. Aproveitamento de água de chuva: Aproveitamento de água de chuva para áreas urbanas e fins não potáveis. São Paulo: Navegar editora, 2003.

TOMAZ, P. Conceito de aproveitamento de água de chuva. IN: TOMAZ, P. Aproveitamento de água de chuva em áreas urbanas para fins não potáveis. 2011.





CAPÍTULO 4

DOI: 10.63951/synapse978-65-88890-61-5_4

YSLANE STEPHANIE MACÊDO DOS SANTOS^{1,2}
LEONARDO LINHARES OLIVEIRA²

PRODUTO ENERGÉTICO MÁXIMO DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS DO TIPO NÚCLEO@CASCA COM GEOMETRIA CILÍNDRICA

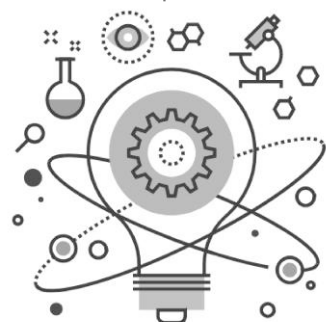
Resumo

O nanomagnetismo, subárea da nanotecnologia, investiga as propriedades magnéticas em escala nanoscópica. Um foco de estudo são as nanopartículas bimagnéticas núcleo-casca, que despertam interesse acadêmico e industrial por suas aplicações que vão da biomedicina a sensores e ímãs permanentes de alto desempenho. O principal parâmetro de avaliação desses materiais é o produto energético máximo, onde os ímãs mais eficientes são constituídos por terras-raras, cuja escassez e elevado custo de processamento representam um desafio. Este estudo buscou, por meio de simulações computacionais, combinar diferentes materiais magnéticos em nanopartículas núcleo-casca cilíndricas, visando aumentar o produto energético e reduzir o uso de terras-raras. As simulações identificaram configurações que ampliaram o produto energético em até 47%, mostrando que essas estruturas podem diminuir a dependência de terras-raras e melhorar o desempenho dos ímãs permanentes. Conclui-se que as nanopartículas núcleo-casca são promissoras para essa finalidade, embora ainda sejam necessárias pesquisas adicionais para confirmar sua eficácia em aplicações práticas.

Palavras-chave: Nanomagnetismo; Terras-raras; Nanopartículas bimagnéticas.

¹ Universidade do Estado do Rio Grande do Norte

² Universidade Federal do Rio Grande do Norte



Abstract

Nanomagnetism, a subarea of nanotechnology, investigates the magnetic properties at the nanoscopic scale. A main focus of study is the core-shell bimagnetic nanoparticles, which have attracted academic and industrial interest due to their applications ranging from biomedicine to sensors and high-performance permanent magnets. The main parameter for evaluating these materials is the maximum energy product, where the most efficient magnets are composed of rare-earth elements, whose scarcity and high processing cost represent a challenge. This study, through computational simulations, aimed to combine different magnetic materials in cylindrical core-shell nanoparticles, seeking to increase the energy product and reduce the use of rare-earth elements. The simulations identified configurations that enhanced the energy product by up to 47%, showing that these structures can decrease the dependence on rare-earth elements and improve the performance of permanent magnets. It is concluded that core-shell nanoparticles are promising for this purpose, although further research is still required to confirm their effectiveness in practical applications.

Keywords: *Nanomagnetism; Rare-earth elements; Bimagnetic nanoparticles.*



INTRODUÇÃO

A nanotecnologia é uma ciência multidisciplinar que atua em diferentes setores, como medicina, informática, telecomunicações e indústria farmacêutica, explorando sistemas na escala dos nanômetros. Dentro desse campo, o nanomagnetismo dedica-se ao estudo das propriedades magnéticas em sistemas nano e mesoscópicos, como nanopartículas, filmes finos, nanofios e multicamadas, que apresentam amplo potencial de aplicação em diagnóstico médico, transporte e tecnologias da informação e comunicação (Colombo, 2012; Frey, 2009). Um destaque dessa área são as nanopartículas bimagnéticas núcleo-casca, que permitem a combinação de diferentes materiais magnéticos em uma única estrutura. Essas partículas apresentam potencial para otimizar ímãs permanentes, cujo desempenho é medido pelo produto energético máximo. Ímãs de alto desempenho geralmente contêm terras-raras, 17 elementos escassos e de difícil extração, cujo custo de produção é elevado (Bourzac, 2011). Assim, a busca por alternativas que reduzam ou eliminem o uso desses elementos sem comprometer a eficiência é um dos principais desafios atuais.

O estudo desenvolvido combinou materiais distintos em nanopartículas núcleo-casca cilíndricas, utilizando simulações computacionais baseadas na teoria micromagnética. Foram analisados efeitos de diferentes combinações, espessuras e acoplamentos magnéticos, buscando configurações que elevassem o desempenho e reduzissem a dependência de terras-raras. A pesquisa envolveu tanto revisão bibliográfica quanto métodos experimentais, reunindo fundamentos teóricos e simulações controladas para avaliar causas e efeitos da variação de parâmetros magnéticos.

Os resultados demonstraram que as estruturas núcleo-casca podem ampliar significativamente o produto energético máximo - $(BH)_{\max}$, contribuindo para a fabricação de ímãs permanentes mais leves, compactos, de menor custo e com menor uso de terras-raras. O trabalho, dividido em quatro seções, abordou o referencial teórico sobre magnetismo e nanomagnetismo, apresentou as simulações computacionais, discutiu os resultados obtidos e, por fim, destacou conclusões e perspectivas para futuras pesquisas.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O magnetismo é um fenômeno natural conhecido desde a antiguidade, quando foi identificado na magnetita (Fe_3O_4), mineral capaz de atrair ferro. Historicamente, sua primeira aplicação prática ocorreu com a bússola, criada pelos chineses, cuja agulha magnetizada se orientava segundo o campo magnético terrestre. A partir do século XIX, a relação entre eletricidade e magnetismo foi estabelecida com

os estudos de Oersted, Ampère, Faraday e Henry, possibilitando o desenvolvimento de motores e geradores elétricos. No nível microscópico, o fenômeno magnético é explicado pelo movimento orbital e pelo spin dos elétrons, que geram o momento magnético associado aos átomos (Callister, 2002; Assis, 2007).

Os materiais magnéticos podem ser classificados em quatro grandes grupos, sendo eles, os diamagnéticos, que criam um campo oposto ao aplicado e, por isso, são fracamente repelidos (Silveira, 2017); os Paramagnéticos, que apresentam dipolos desordenados e só adquirem magnetização na presença de campo externo, perdendo-a quando este é retirado (Pinho, 2009); os antiferromagnéticos, nos quais os momentos magnéticos se alinham antiparalelamente, resultando em magnetização líquida nula (Weizenmann, 2010); os ferromagnéticos, que mantêm alinhamento magnético mesmo após a retirada do campo externo, graças à interação de troca. Este grupo se subdivide em ferromagnéticos macios, de fácil magnetização e baixa coercividade, e ferromagnéticos duros, caracterizados por alta coercividade e adequados à fabricação de ímãs permanentes (Jiles, 1991; Martins, 2001).

Os ímãs permanentes, fundamentais em diversas aplicações tecnológicas, são avaliados pelo parâmetro produto energético máximo $(BH)_{\max}$, que corresponde à maior energia que podem fornecer para aplicações externas. Materiais de alto desempenho nesse aspecto são, em geral, compostos por terras-raras como neodímio, samário e disprósio, mas sua escassez e alto custo de extração geram limitações econômicas e ambientais (Wing, 1997; Strnat, 1990).

O nanomagnetismo surge como um ramo da nanotecnologia dedicado ao estudo das propriedades magnéticas em escala nanométrica. O avanço experimental e computacional possibilitou a fabricação de nanoestruturas com alto grau de pureza e novas propriedades, diferentes das observadas em materiais macroscópicos. Isso abriu espaço para aplicações em áreas como medicina (ressonância magnética, transporte de fármacos), informática (memórias magnéticas), telecomunicações e desenvolvimento de ímãs permanentes mais eficientes (Rezende, 2002; Assis, 2012).

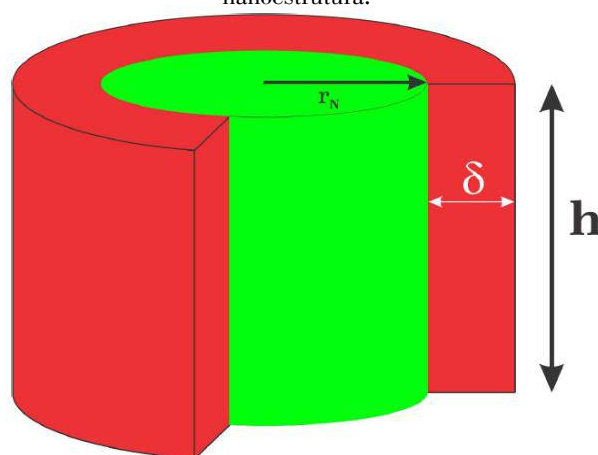
Para compreender o comportamento magnético em nanoestruturas, a teoria micromagnética fornece uma descrição matemática baseada na análise da curva de magnetização, dos comprimentos característicos e das energias envolvidas. Esse formalismo permite identificar os estados de equilíbrio magnético em partículas e filmes finos. A curva de histerese, por exemplo, indica o tipo de material (macio ou duro) e possibilita calcular o $(BH)_{\max}$ (Coey, 2010; Oliveira, 2016).

Além disso, métodos numéricos como o método auto-consistente possibilitam simular o comportamento de partículas magnéticas com diferentes

geometrias, estabelecendo parâmetros de equilíbrio. Essa abordagem é aplicada especialmente ao estudo de nanopartículas bimagnéticas do tipo núcleo@casca, nas quais o núcleo e a casca apresentam propriedades distintas (por exemplo, núcleo duro de FePt e casca macia de CoFe₂). Essa configuração permite combinar alta coercividade com elevada magnetização de saturação, resultando em aumento significativo do produto energético máximo e redução da dependência de elementos terras-raras (Oliveira, 2016; Callister, 2002; Jiles, 1991).

O estudo desenvolvido combinou materiais distintos em uma nanoestrutura do tipo núcleo@casca com geometria cilíndrica, em que o núcleo possui um raio r_N e a casca possui uma espessura δ , e toda a nanoestrutura possui altura h , conforme esquema na Figura 1.

Figura 1: Representação esquemática de uma nanopartícula do tipo núcleo@casca, onde corresponde r_N ao raio do núcleo, δ refere-se à espessura da casca e h é a altura da nanoestrutura.



Fonte: Autores (2019).

Os sistemas descritos no presente trabalho são nanoestruturas magnéticas compostas de dois materiais magnéticos, um material ferromagnético que constitui o núcleo e um material ferromagnético que constitui a casca. Como o sistema apresenta dimensões nanométricas, descrever uma nanopartícula considerando cada íon que a constitui é, do ponto de vista computacional, inviável, pois envolve um número relativamente grande de variáveis acopladas magneticamente.

Para contornar essa limitação, faremos uso da teoria micro magnética na descrição das energias magnéticas envolvidas e as nanoestruturas, quaisquer que sejam sua geometria, serão subdivididas em pequenas regiões de simetria cúbica, denominadas de células de simulação, em que cada uma representa uma pequena

porção da nanoestrutura. O tamanho da célula de simulação é escolhido de forma a garantir que cada uma apresente magnetização uniforme. Portanto, cada célula deve apresentar dimensões que estejam em consonância com os parâmetros intrínsecos dos materiais envolvidos.

A descrição das fases magnéticas de equilíbrio é feita em termos dos momentos magnéticos das células de simulação. A energia magnética é definida como função desses momentos magnéticos. A densidade de energia magnética total é dada por:

$$E = \frac{A}{d^2} \sum_j \sum_k (1 - \hat{m}_j \cdot \hat{m}_k) - M_S \vec{H} \cdot \sum_j \hat{m}_j - K \sum_j (\hat{m}_j^x)^2 + \frac{M_S}{2} \sum_j \sum_k \left(\frac{\hat{m}_j \cdot \hat{m}_k}{n_{jk}^3} - \frac{3(\hat{m}_j \cdot \hat{n}_{jk})(\hat{m}_k \cdot \hat{n}_{jk})}{n_{jk}^5} \right) \quad (1)$$

Onde o primeiro termo representa a energia de troca, sendo A a constante de rigidez de troca. O versor de magnetização local é $\hat{m}_j = \frac{\vec{M}_j}{M_S}$ ($j = 1, \dots, N$), com $|\hat{m}_j| = 1$; aqui \vec{M}_j é a magnetização média na célula i e M_S a magnetização de saturação do material. O segundo termo corresponde à energia de Zeeman associada ao campo externo aplicado H . O terceiro termo descreve a energia de anisotropia cristalina uniaxial, com constante K (e eixo fácil \hat{i}). Por fim, o quarto termo está associado à energia de interação dipolar, na qual $n_{jk} = |\vec{r}_j - \vec{r}_k|/d$ é a distância adimensional entre as células j e k , expressa em unidades do tamanho de célula de simulação d . Na descrição numérica dos materiais magnéticos do presente trabalho foram utilizados os seguintes parâmetros magnéticos: Para Fe usamos $M_S = 1700$ emu/cm³, $A = 25 \times 10^{-7}$ erg/cm, e $K = 4.8 \times 10^5$ erg/cm³ (Vaz, 2008). Para CoFe₂ usamos $M_S = 1800$ emu/cm³, $A = 1.9 \times 10^{-7}$ erg/cm, e $K = 1.7 \times 10^5$ erg/cm³ (Soares, 2013). Para FePt usamos $M_S = 1139$ emu/cm³, $A = 1.0 \times 10^{-6}$ erg/cm, e $K = 6.6 \times 10^7$ erg/cm³ (Jimenez-Villacorta, 2014).

A configuração de equilíbrio é encontrada usando um algoritmo autoconsciente, onde a magnetização \vec{m}_j é ajustada para ser paralela ao campo magnético local $\left[H_{eff}^j = - \left(\frac{1}{M_S} \right) \left(\frac{\partial E}{\partial \vec{m}_j} \right) \right]$, de modo que, dentro de uma precisão numérica razoável, $(\vec{m}_j \times H_{eff}^j = 0)$. A convergência é verificada para garantir um torque máximo de 10^{-12} J.

Assim, o referencial teórico fundamenta-se na relação entre magnetismo clássico, classificação dos materiais, avanços do nanomagnetismo e aplicação da

teoria micromagnética, destacando a relevância do estudo de nanopartículas núcleo@casca como alternativa promissora para o desenvolvimento de ímãs permanentes de alto desempenho, mais econômicos e sustentáveis.

3. METODOLOGIA

A presente pesquisa foi conduzida em duas etapas complementares, bibliográfica e experimental. Na primeira etapa, realizou-se uma pesquisa bibliográfica, com base em obras e artigos científicos que tratam do nanomagnetismo, das nanopartículas bimagnéticas do tipo núcleo-casca e dos materiais ferromagnéticos. Essa investigação possibilitou reunir conceitos já consolidados, analisar diferentes teorias e avaliar suas contribuições para o entendimento da problemática abordada. Segundo Koche (2006), a pesquisa bibliográfica busca explicar um problema a partir do conhecimento disponível em teorias já publicadas, levantando e analisando contribuições relevantes ao tema. Dessa forma, a revisão de literatura foi fundamental para embasar teoricamente o estudo, direcionando as escolhas metodológicas e experimentais.

A segunda etapa corresponde à pesquisa experimental, na qual foram realizadas simulações computacionais. Conforme Bastos (1991), a pesquisa experimental consiste em refazer condições de um fenômeno para observá-lo sob controle, utilizando instrumentos de precisão que permitam estudar suas causas e efeitos. Nesse contexto, adotou-se a teoria micromagnética para descrever os sistemas magnéticos estudados, aplicando-se o conceito de célula de simulação em geometria cilíndrica. Essa abordagem possibilitou investigar o comportamento das fases magnéticas de equilíbrio em nanopartículas núcleocasca, considerando as interações entre núcleo e casca. Foram realizadas diferentes combinações de materiais ferromagnéticos, com variações de espessura da casca e dimensões do núcleo, para analisar os efeitos sobre o produto energético máximo $(BH)_{\max}$.

As simulações permitiram identificar a influência do acoplamento magnético entre núcleo e casca no desempenho do sistema, avaliando o padrão de magnetização e as fases magnéticas ao longo do processo de desmagnetização. Essa etapa revelou como parâmetros geométricos e de composição podem ampliar o produto energético máximo, contribuindo para o desenvolvimento de ímãs permanentes mais eficientes e com menor dependência de elementos terras-raras.

Portanto, a metodologia adotada uniu uma fundamentação teórica consistente à experimentação numérica detalhada, permitindo avaliar a viabilidade do uso de nanopartículas bimagnéticas núcleo-casca em geometria cilíndrica como alternativa para otimizar materiais magnéticos e reduzir os custos associados ao emprego de terras-raras.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos neste trabalho evidenciam a relevância do estudo das nanopartículas bimagnéticas do tipo núcleo@casca, com geometria cilíndrica, para a otimização do produto energético máximo $((BH)_{\max})$ em ímãs permanentes. Conforme demonstrado nas simulações, a combinação de um núcleo constituído por FePt (material ferromagnético duro) e uma casca de CoFe (material ferromagnético macio) mostrou-se eficaz para a melhoria das propriedades magnéticas das nanopartículas, permitindo alcançar ganhos energéticos expressivos quando comparadas às partículas isoladas.

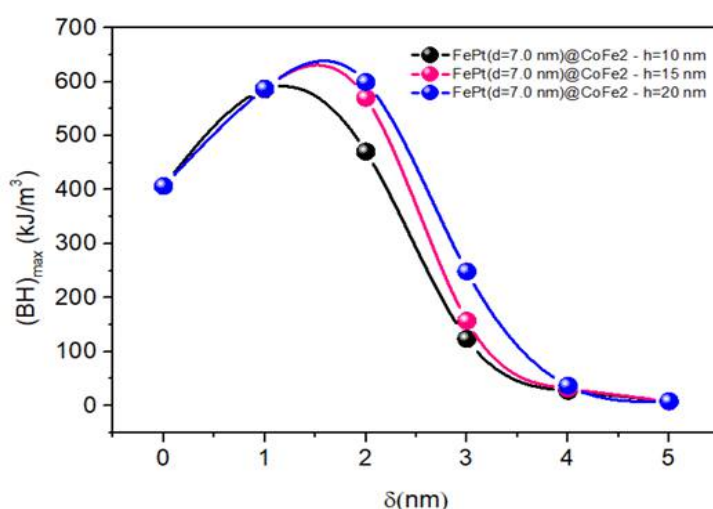
O FePt é uma liga metálica formada por ferro (Fe) e platina (Pt), essa liga apresenta comportamento de material ferromagnético duro, ou seja, possui alta coercividade (resistência à desmagnetização) e, portanto, é capaz de manter a magnetização mesmo após a retirada do campo externo. Devido a essas propriedades, o FePt é considerado excelente candidato para compor o núcleo das nanopartículas, funcionando como a parte “estável” do sistema magnético. Além disso, o FePt tem sido estudado para aplicações em ímãs permanentes, dispositivos de gravação magnética de alta densidade e nanotecnologia aplicada à medicina, devido à sua forte anisotropia magnetocristalina (Oliveira, 2016; Coey, 2010).

A liga composta por cobalto (Co) e ferro (Fe), também conhecida como CoFe₂ (Cobalto-Ferro) é classificada como um material ferromagnético macio, ou seja, apresenta baixa coercividade e alta permeabilidade magnética. Na prática, isso significa que ele pode ser magnetizado e desmagnetizado facilmente, o que o torna adequado para compor a casca das nanopartículas núcleo@casca. O papel do CoFe₂ nesse tipo de estrutura é fornecer alta magnetização de saturação, contribuindo para o aumento do produto energético máximo $((BH)_{\max})$ quando acoplado a um material duro, como o FePt (Jiles, 1991; Callister, 2002).

As análises iniciais confirmaram que nanopartículas com núcleo de FePt isolado apresentaram valores consideráveis de $(BH)_{\max}$, contudo, a adição de uma

camada de CoFe_2 como casca potencializou significativamente o desempenho. Observou-se, por exemplo, que para núcleos de 7 nm revestidos por uma casca de 2 nm, o $(\text{BH})_{\text{max}}$ atingiu valores em torno de $599,40 \text{ kJ/m}^3$, representando um incremento de 32,13% em relação à partícula isolada, que apresentou aproximadamente $406,77 \text{ kJ/m}^3$. Para partículas com núcleo de 11 nm, verificou-se comportamento análogo, alcançando $578,98 \text{ kJ/m}^3$ com a espessura crítica da casca ($\delta^* = 2 \text{ nm}$), conforme ilustra a Figura 2.

Figura 2 - Produto energético máximo da nanopartícula do tipo núcleo@casca com FePt no núcleo e CoFe_2 na casca. O diâmetro do núcleo é fixado em 7 nm. A espessura da casca varia de 0 nm a 5 nm e a altura da nanopartícula varia de 10 nm até 20 nm.



Fonte: autores (2019).

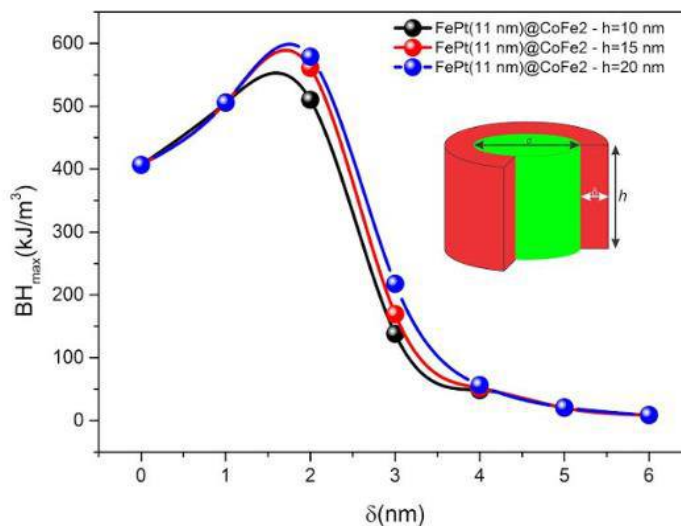
Esses resultados demonstram que as dimensões físicas da nanopartícula, como o diâmetro do núcleo, a espessura da casca e a altura do cilindro, exercem influência direta sobre o desempenho magnético. De fato, foi possível identificar que existe uma espessura crítica da casca (δ^*) em que o $(\text{BH})_{\text{max}}$ é maximizado. A partir desse ponto, aumentos adicionais na espessura da casca não resultam em crescimento do produto energético, mas sim em redução do desempenho magnético, evidenciando uma dependência não linear entre os parâmetros geométricos e a resposta magnética da nanopartícula.

Os resultados da Figura 2 mostram o comportamento do produto energético máximo ($(\text{BH})_{\text{max}}$) em função da espessura da casca para nanopartículas com núcleo de FePt ($d = 11 \text{ nm}$) e casca de CoFe_2 com diferentes alturas. Observou-se que o $(\text{BH})_{\text{max}}$ está diretamente relacionado à espessura da casca, apresentando comportamento crescente até atingir um valor crítico, a partir do qual passa a

decrecer. Para uma nanopartícula isolada de FePt ($d = 11$ nm), o valor obtido foi de $406,71 \text{ kJ/m}^3$. Já a nanopartícula bimagnética FePt($d = 11$ nm)@CoFe₂($\delta = 2$ nm, $h = 10$ nm) alcançou $510,28 \text{ kJ/m}^3$, evidenciando a existência de uma espessura crítica $\delta^* = 2$ nm. Além disso, verificou-se que o aumento da altura da nanopartícula também impacta o desempenho: quando $h = 20$ nm, o valor atingiu $578,98 \text{ kJ/m}^3$, representando um ganho de $11,86\%$ em relação à altura de 10 nm e de $29,75\%$ em relação à nanopartícula isolada.

A comparação entre os gráficos das Figuras 2 e 3 evidencia que núcleos de menor diâmetro favorecem um crescimento mais rápido do produto energético máximo. Para um núcleo de 7 nm com casca de 2 nm e altura de 20 nm, o valor atingiu $599,4 \text{ kJ/m}^3$, enquanto para um núcleo de 11 nm, nas mesmas condições, o resultado foi ligeiramente inferior ($578,98 \text{ kJ/m}^3$). As simulações também demonstraram que nanopartículas isoladas apresentam $(BH)_{\text{max}}$ inferior quando comparadas às revestidas até determinada espessura.

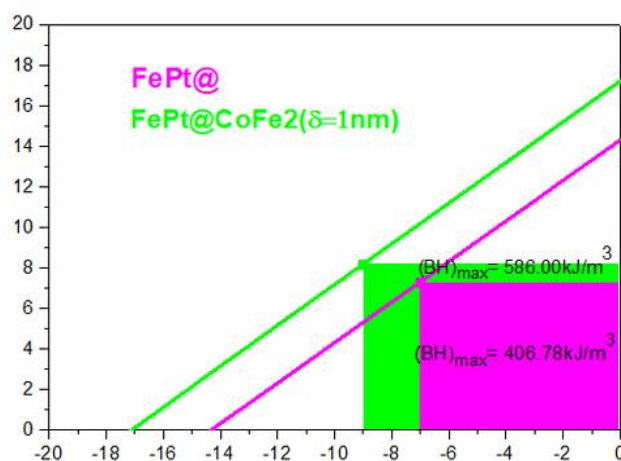
Figura 3 Produto energético máximo da nanopartícula do tipo núcleo@casca com FePt no núcleo e CoFe₂ na casca. O diâmetro do núcleo é fixado em 11 nm. A espessura da casca varia de 0 nm a 5 nm e a altura da nanopartícula varia de 10 nm a 20 nm



Fonte: autores (2019).

Esse comportamento pode ser visualizado na Figura 4, em que uma nanopartícula isolada de 7 nm alcançou $406,78 \text{ kJ/m}^3$, ao passo que a mesma partícula revestida com casca de 1 nm apresentou $586,0 \text{ kJ/m}^3$, representando um ganho de $30,58\%$ no desempenho magnético.

Figura 4 - Quadrante desmagnetizante de nanopartículas FePt com altura de 10 nm isolado com diâmetro de núcleo de 7 nm e revestido com 1 nm de CoFe₂. As regiões retangulares correspondem as áreas do produto energético máximo.

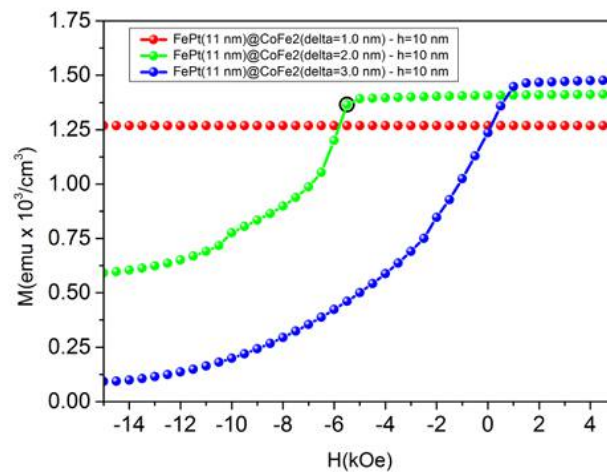


Fonte: autores (2019).

O mesmo comportamento foi observado para diferentes alturas das nanopartículas. Para um núcleo de 7 nm com altura de 15 nm, o produto energético máximo da partícula isolada foi de 406,78 kJ/m³, enquanto a partícula revestida com uma casca de 1 nm atingiu 586,76 kJ/m³, representando um ganho de 30,67% em relação à configuração sem revestimento.

A Figura 5 mostra a curva de magnetização de nanopartículas FePt ($d = 11\text{nm}$)@CoFe₂ com altura de 10nm e diferentes espessuras de casca (1, 2 e 3nm). Observa-se que, para cascas mais finas, a magnetização permanece uniforme, mas aumentar a espessura da casca leva a uma queda significativa na magnetização. A nanopartícula com casca de 2 nm apresentou o maior produto energético ($(BH)_{\text{max}}$), enquanto as nanopartículas com cascas de 1 e 3 nm mostraram valores menores, devido à diminuição da magnetização provocada pelo efeito do campo dipolar do núcleo sobre a casca. A curva azul mostra que a nanopartícula FePt($d = 11\text{nm}$)@CoFe₂ com casca de 3nm e altura de 10nm apresenta maior magnetização de saturação. Intuitivamente, isso sugeriria um maior produto energético ($(BH)_{\text{max}}$), mas os resultados mostram o contrário. O acoplamento dipolar entre núcleo e casca cria um campo magnético sobre a casca, que pode induzir padrões de magnetização não uniformes ou até reversão antecipada da magnetização, reduzindo a magnetização líquida e, conseqüentemente, o $(BH)_{\text{max}}$. Esse efeito é mais pronunciado em nanopartículas com cascas mais espessas.

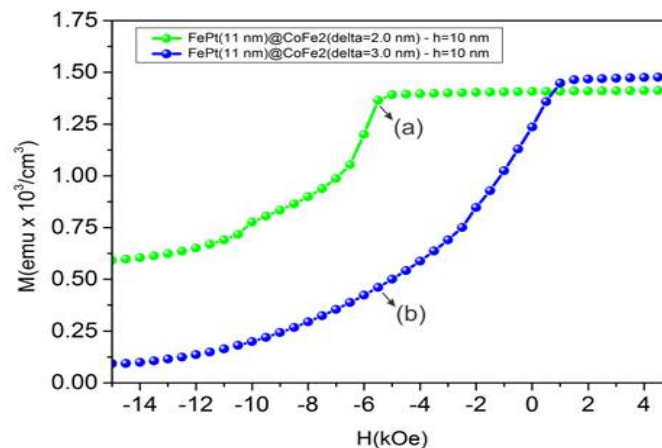
Figura 5 - Segundo quadrante da curva de magnetização para uma nanopartícula FePt($d = 11\text{ nm}$)@CoFe₂(δ) $h=10\text{ nm}$.



Fonte: autores (2019).

A Figura 5 mostra as curvas de magnetização no regime de desmagnetização para nanopartículas FePt($d = 11\text{ nm}$)@CoFe₂ com cascas de 2 e 3 nm, ambas com altura de 10 nm. O ponto (a) na curva verde indica o produto energético máximo, atingido em $H_{\text{ext}} = 55\text{ kOe}$, quando a magnetização líquida praticamente alcança a saturação. O ponto (b) na curva azul, sob o mesmo campo, mostra que a magnetização é muito menor que a saturação. Isso ocorre devido à interação do campo dipolar do núcleo com a casca, especialmente em nanopartículas com cascas mais espessas, que sofrem reversão parcial da magnetização da casca externa. Em cascas mais finas, esse efeito é menor, preservando melhor a magnetização e permitindo que o produto energético máximo seja mais elevado.

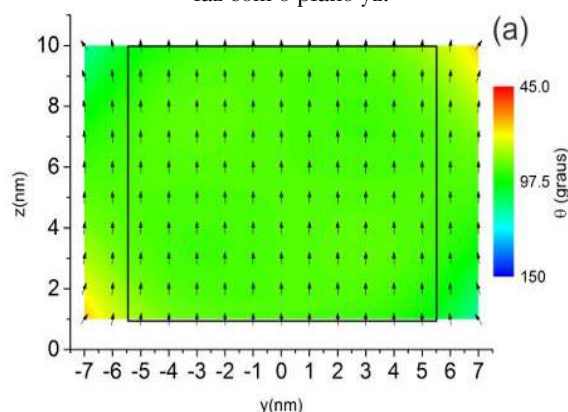
Figura 6 - Segundo quadrante da curva de magnetização para uma



Fonte: autores (2019).

A Figura 7 mostra o perfil de magnetização no ponto (a) da Figura 6. O núcleo e a maior parte da casca estão magnetizados na direção z, enquanto pequenas regiões nas extremidades da casca apresentam momentos magnéticos inclinados em relação ao plano yz, com ângulos de cerca de 60° e 120°, indicando que a magnetização nessas áreas sai do plano da página. Esse padrão ocorre de forma simétrica nas extremidades opostas.

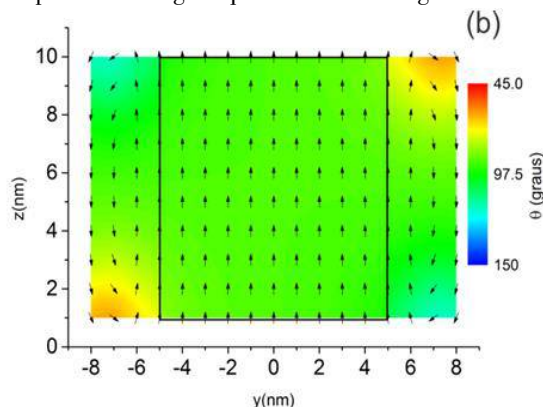
Figura 7 - Perfil magnético de uma nanopartícula $\text{FePt}(d = 11\text{nm})@\text{CoFe}_2(\delta=2.0\text{nm}) \times h=10$ visto do plano yz. O código de cores representa o ângulo que o momento magnético faz com o plano yz.



Fonte: autores, (2019).

A Figura 8 mostra o perfil de magnetização no ponto (b) da Figura 6. O núcleo está uniformemente magnetizado na direção z, enquanto grande parte da casca externa apresenta magnetização na direção negativa do eixo z. Nas extremidades, os momentos magnéticos formam ângulos com o plano yz. Assim, uma parcela significativa da casca contribui negativamente para a magnetização total, impactando negativamente o produto energético máximo.

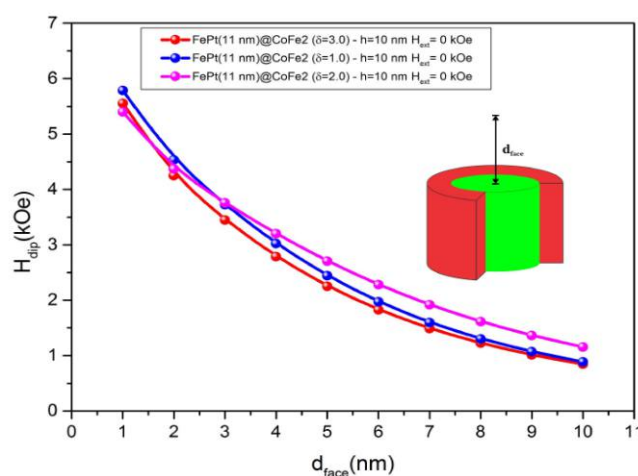
Figura 8 - Perfil magnético de uma nanopartícula $\text{FePt}(d = 11\text{ nm})@\text{CoFe}_2(\delta=3.0\text{ nm}) \times h=10$ visto do plano yz. O código de cores representa o ângulo que o momento magnético faz com o plano yz.



Fonte: autores (2019).

A Figura 9 mostra o campo dipolar gerado pelas nanopartículas ao longo do eixo longitudinal, medido a diferentes distâncias da face superior. As nanopartículas com $(BH)_{\max}$ otimizado produzem campos magnéticos mais intensos mesmo a distâncias maiores. Por exemplo, a 5 nm da face, a nanopartícula com casca de 2 nm gera 2,70 kOe, enquanto as de 1 e 3 nm geram 2,43 kOe e 2,25 kOe, respectivamente. A 10 nm de distância, a nanopartícula de 2 nm ainda apresenta o melhor desempenho (1,15 kOe) em comparação com 0,84 kOe das de 1 e 3 nm.

Figura 9 - Campo dipolar produzido pela nanopartícula na sua região externa medido a uma distância d_{face} , a partir da face superior na linha que passa pelo eixo do cilindro



Fonte: autores(2019).

De acordo com o modelo teórico proposto por Skomski (Coey, 1993), a magnetização média é proporcional à contribuição do núcleo e/ou da casca e à fração volumétrica correspondente, sugerindo que um aumento contínuo da magnetização média resultaria em elevação proporcional do $(BH)_{\max}$. No entanto, as simulações realizadas neste trabalho demonstraram que tal comportamento não se confirmou integralmente, visto que os valores de $(BH)_{\max}$ não aumentaram indefinidamente com a magnetização média, mas apresentaram pontos de máximo, seguidos por redução conforme a espessura da casca.

Essa discrepância pode ser explicada pelo efeito das interações magnéticas entre núcleo e casca, especialmente as interações dipolares, que não são consideradas nos modelos simplificados, mas foram incorporadas nas simulações numéricas desenvolvidas. Tais interações influenciam diretamente a magnetização residual das nanopartículas, ocasionando comportamentos distintos, como reversões parciais da magnetização e não uniformidade nos perfis magnéticos.

Outro ponto importante revelado pelas simulações foi o comportamento do campo magnético externo produzido pelas nanopartículas. As partículas com $(BH)_{\max}$ otimizado, ou seja, aquelas configuradas com dimensões críticas de núcleo e casca, demonstraram maior intensidade de campo em pontos mais distantes da superfície do cilindro. Esse resultado é de grande relevância prática, pois sugere que nanopartículas com estrutura núcleo@casca podem ser aplicadas em dispositivos que requerem campos magnéticos intensos e estáveis, mesmo em regiões externas ao material, característica essencial para a construção de ímãs permanentes nanoestruturados de alto desempenho.

Os resultados também corroboram achados anteriores da literatura. Oliveira (2016), por exemplo, já havia apontado a importância de se considerar as dimensões físicas das partículas na determinação de suas propriedades magnéticas, especialmente em estruturas nanoestruturadas. Entretanto, os dados aqui obtidos ampliam esse entendimento, ao demonstrar que a simples maximização da magnetização média, prevista teoricamente, não é suficiente para garantir um maior produto energético. É necessário levar em consideração o equilíbrio entre núcleo e casca, assim como as interações entre eles, de modo a encontrar a configuração geométrica mais favorável.

Dessa forma, pode-se afirmar que nanopartículas do tipo núcleo@casca com geometria cilíndrica representam uma alternativa promissora para a construção de ímãs permanentes otimizados, sobretudo pela possibilidade de reduzir ou até eliminar a necessidade de utilização de terras-raras em sua composição. A identificação de espessuras críticas da casca e a compreensão da influência das dimensões físicas permitem orientar futuros estudos e aplicações, contribuindo tanto para avanços acadêmicos quanto para inovações industriais, sobretudo em setores que demandam dispositivos de alta eficiência energética.

Em síntese, a análise dos resultados confirma que a otimização do $(BH)_{\max}$ em nanopartículas núcleo@casca depende de fatores geométricos específicos, que devem ser cuidadosamente ajustados para cada aplicação. Além disso, destaca-se que o campo magnético gerado por partículas configuradas em sua condição crítica apresenta maior alcance e intensidade, reforçando o potencial tecnológico desse tipo de nanoestrutura. Ainda que os resultados sejam satisfatórios e indicativos de grande aplicabilidade, torna-se necessário o aprofundamento de estudos experimentais complementares, a fim de validar as previsões numéricas e consolidar a viabilidade da utilização dessas estruturas no desenvolvimento de ímãs permanentes sem terras-raras.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A produção de ímãs permanentes está diretamente associada ao desenvolvimento de materiais magnéticos. Contudo, sua fabricação apresenta um custo elevado, uma vez que, em geral, esses ímãs são constituídos por elementos do tipo terras-raras. Nesse sentido, a investigação de nanoestruturas do tipo núcleo@casca apresenta-se como uma alternativa viável para minimizar tal problemática, possibilitando a combinação de dois elementos com propriedades magnéticas distintas. Essa abordagem busca não apenas aprimorar a composição dos materiais magnéticos, mas também otimizar o valor do produto energético máximo $((BH)_{\max})$. Os resultados obtidos indicam que esse melhor desempenho pode ser alcançado por meio da utilização de nanopartículas bi-magnéticas com estrutura do tipo núcleo@casca.

Ao longo do desenvolvimento deste trabalho, verificou-se que o acoplamento de dois materiais distintos torna possível a produção de materiais magnéticos sem a necessidade de terras-raras, além de permitir a ampliação do $(BH)_{\max}$ em determinadas configurações estruturais. Os estudos realizados evidenciam que a combinação de diferentes propriedades magnéticas pode aumentar significativamente o produto energético máximo. Para tanto, foram conduzidas simulações e análises de nanopartículas cilíndricas do tipo núcleo@casca, constituídas pela associação de materiais ferromagnéticos duros e macios. Dentre as combinações investigadas, considerou-se um núcleo formado por FePt e uma casca composta por CoFe₂. Essa associação buscou explorar de forma otimizada as propriedades magnéticas distintas do núcleo e da casca, visando a ampliação do $(BH)_{\max}$, uma vez que este depende diretamente da magnetização média da partícula.

De acordo com o modelo proposto por R. Skomski (Coey, 1993), o aumento da magnetização média é proporcional à magnetização do núcleo e/ou da casca, assim como à fração volumétrica ocupada por cada um. Todavia, embora o modelo teórico aponte que quanto maior a magnetização média, maior seria o produto energético máximo, as simulações realizadas não confirmaram integralmente essa hipótese.

Os resultados demonstraram que, para as nanopartículas bi-magnéticas, o valor ótimo de $(BH)_{\max}$ foi atingido, porém não apresentou comportamento de crescimento contínuo com o aumento da espessura da casca, como previsto

teoricamente. Tanto as estruturas com núcleo de 7nm quanto as de 11nm apresentaram um ponto de máximo desempenho até determinada espessura da casca, após o qual o produto energético começou a decrescer. Tal comportamento pode ser explicado pelas interações entre os materiais do núcleo e da casca, que interferem na magnetização residual da nanopartícula e, consequentemente, no valor do $(BH)_{\max}$.

Assim, nanopartículas bi-magnéticas do tipo núcleo@casca, especialmente em geometria cilíndrica, configuram-se como alternativas promissoras para a produção de ímãs permanentes nanoestruturados. Verificou-se que essas estruturas apresentam um $(BH)_{\max}$ otimizado quando o núcleo apresenta dimensões reduzidas e a espessura da casca encontra-se em um ponto de equilíbrio ideal. Dessa forma, os resultados obtidos confirmam que variáveis físicas, tais como o diâmetro do núcleo, a espessura da casca e a altura das nanopartículas, influenciam de maneira significativa no produto energético máximo. Além disso, observou-se que o campo magnético gerado pelas partículas com $(BH)_{\max}$ otimizado apresentou maior intensidade em pontos mais distantes da nanopartícula, evidenciando o potencial dessas estruturas no desenvolvimento de novos materiais magnéticos.

REFERÊNCIAS

ASSIS, André Koch Torres. Ampère e a origem do magnetismo terrestre. 2007. Dissertação (Mestrado em Filosofia) - Instituto de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

ASSIS, J. de Souza Ribeiro; ASSIS, Maria Lucy Vieira de. Conhecendo a nanociência e a nanotecnologia: uma abordagem interdisciplinar para o ensino de química, física e biologia no nível médio. 2012. Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Química) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2012.

BASTOS, Cleverson Leite; KELLER, Vicente. Aprendendo a aprender: introdução à metodologia científica. Petrópolis: Vozes, 1991.

BOURZAC, K. The rare-earth crisis. *Technology Review*, Cambridge, v. 114, n. 3, p. 58, jun. 2011.

CALLISTER JR., William D. Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

COLOMBO, M. et al. Biological applications of magnetic nanoparticles. *Chemical Society Reviews*, Londres, v. 41, p. 4306-4334, 2012.

COEY, J. M. D. Magnetism and Magnetic Materials. Cambridge: Cambridge University Press, 2010.

FREY, N. A. et al. Magnetic nanoparticles: synthesis, functionalization, and applications in bioimaging and magnetic energy storage. *Chemical Society Reviews*, Londres, v. 38, p. 2532-2542, 2009.

GIERAS, J. F.; WING, M. Permanent magnet motor technology: design and applications. 2. ed. New York: Marcel Dekker, 2002.

JILES, David. Introduction to Magnetism and Magnetic Materials. New York: Springer US, 1991.

JIMENEZ-VILLACORTA, F.; LEWIS, L. H. Advanced Permanent Magnetic Materials. In: GONZALEZ ESTEVEZ, J. M. (ed.). Nanomagnetism. Manchester, UK: One Central Press, 2014. p. 160-196.

KÖCHE, José Carlos. Fundamentos de metodologia científica: teoria da ciência e prática da pesquisa. 24. ed. Petrópolis: Vozes, 2006.

MARTINS, M. Comportamento Magnético dos Materiais. Curitiba: UTFPR, 2001. Disponível em: <http://paginapessoal.utfpr.edu.br/edsonsilva/materiais-eletricos/material-de-apoio/Comportamento%20Magnético%20dos%20Materiais.pdf>. Acesso em: 15 mar. 2019.

OLIVEIRA, L. L. de. Nanoestruturas magnéticas do tipo núcleo-casca: um estudo do impacto do campo dipolar. 2016. 63 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

PINHO, Luís Carlos Alves Bandeira de. Materiais magnéticos e suas aplicações. 2009. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2009.

REZENDE, Sergio Machado. Nanomagnetismo. *ComCiência*, n. 32, 10 nov. 2002.





CAPÍTULO 5

DOI: 10.63951/synapse978-65-88890-61-5_5

TANARA CAROLINE NUNES NICÁCIO^{1,2}

THALITA QUEIROZ E SILVA^{1,2}

ARGEU CAVALCANTE FERNANDES¹

EUZÉBIO GUIMARÃES BARBOSA¹

LILIA BASÍLIO DE CALAND²

AVALIAÇÃO DA REAÇÃO DE TRANSESTERIFICAÇÃO DO ÓLEO DE ALGODÃO EMPREGANDO ROTA METÍLICA E ETÍLICA

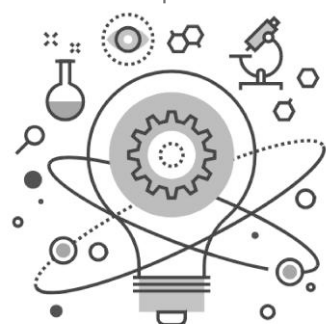
Resumo

O presente trabalho avaliou a síntese de biodiesel a partir do óleo de algodão por meio da reação de transesterificação utilizando as rotas metílica e etílica. As reações foram conduzidas em diferentes condições de temperatura, tempo e concentração de catalisador, sendo o produto obtido caracterizado por análises de rendimento, índice de acidez, índice de iodo, espectroscopia no infravermelho (FTIR) e ressonância magnética nuclear (¹H-NMR). Os resultados indicaram que a rota metílica apresentou rendimentos superiores, com maior facilidade de separação das fases e menor formação de emulsões, enquanto a rota etílica, embora promissora, mostrou dificuldades operacionais que impactaram o processo de purificação. Os índices de acidez das amostras foram inferiores ao limite estabelecido pela ANP, confirmando a boa qualidade dos produtos, e os índices de iodo atenderam às especificações internacionais, garantindo estabilidade oxidativa. As análises espectroscópicas confirmaram a formação dos ésteres metílicos e etílicos, evidenciando a eficiência do processo. Dessa forma, a pesquisa demonstra a viabilidade do óleo de algodão como matéria-prima para produção de biodiesel, destacando a rota metílica como a mais eficiente nas condições avaliadas.

Palavras-chave: Biodiesel; Óleo de algodão; Transesterificação; Rota metílica; Rota etílica.

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Norte

² Universidade do Estado do Rio Grande do Norte



Abstract

This study evaluated the synthesis of biodiesel from cottonseed oil through the transesterification reaction using both methylic and ethylic routes. The reactions were conducted under different conditions of temperature, reaction time, and catalyst concentration, and the obtained biodiesel was characterized by yield analysis, acid value, iodine value, Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR), and proton nuclear magnetic resonance ($^1\text{H-NMR}$). The results indicated that the methylic route achieved higher yields, easier phase separation, and lower emulsion formation, while the ethylic route, although promising, presented operational difficulties that affected the purification process. The acid values of the samples were below the limits established by ANP, confirming the good quality of the products, and the iodine values met international specifications, ensuring oxidative stability. Spectroscopic analyses confirmed the formation of methyl and ethyl esters, demonstrating the efficiency of the process. Therefore, the study highlights cottonseed oil as a viable raw material for biodiesel production, with the methylic route standing out as the most efficient under the evaluated conditions.

Keywords: Biodiesel; Cottonseed oil; Transesterification; Methylic route; Ethylic route.



INTRODUÇÃO

As reservas de combustíveis fósseis estão se esgotando progressivamente e, além disso, sua queima libera emissões que poluem o meio ambiente (Lelieveld *et al.*, 2019). Formados por processos naturais de decomposição de matéria orgânica ao longo de milhões de anos, esses combustíveis são fontes não renováveis, com disponibilidade limitada. Além do esgotamento, sua utilização contribui para o aumento do efeito estufa, devido à liberação de grandes quantidades de gases poluentes (Krozer, 2022). Nesse contexto, cresce a preocupação quanto à dependência energética, especialmente porque a matriz brasileira ainda apresenta forte vínculo com essas fontes (Santos; Castro; Costa, 2023).

Diante desse contexto, as preocupações relacionadas à poluição ambiental e à segurança energética têm impulsionado a busca por fontes alternativas capazes de reduzir a dependência de combustíveis fósseis (Vellaiyan, 2024). Entre as alternativas, o biodiesel tem se apresentado como uma das principais opções de biocombustível, devido a propriedades como biodegradabilidade, baixa toxicidade e características físico-químicas comparáveis ao diesel mineral (Kittur *et al.*, 2021). Além disso, sua utilização contribui para a diversificação da matriz energética e para a redução das emissões de gases de efeito estufa, favorecendo uma transição para sistemas mais sustentáveis. O biodiesel é obtido por meio da reação de transesterificação, processo químico no qual triglicerídeos presentes em óleos vegetais ou gorduras animais reagem com um álcool de cadeia curta, geralmente metanol ou etanol, na presença de um catalisador, produzindo ésteres metílicos ou etílicos, que constituem o biodiesel, e glicerina como coproduto (ANP, 2017).

No Brasil, a produção de biodiesel depende do cultivo de oleaginosas, e o país apresenta condições territoriais e climáticas favoráveis para essa atividade (Castro; Barañano, 2019). Tal cenário tem incentivado investimentos em políticas públicas voltadas para o aproveitamento das potencialidades regionais, gerando renda, empregos e promovendo o desenvolvimento sustentável (Ribeiro; Silva, 2020). Além disso, o uso de culturas energéticas na produção de biodiesel proporciona benefícios ambientais, como a redução da chuva ácida, do efeito estufa e das emissões de CO₂, SO_x e hidrocarbonetos não queimados durante a combustão (Park *et al.*, 2024).

Consequentemente, cresce a importância de pesquisas voltadas ao cultivo de oleaginosas e à produção de biodiesel, especialmente a partir de matérias-primas ricas em óleo, como o algodão. O óleo de *Gossypium hirsutum* (caroço de algodão) é uma matéria-prima importante para a produção de biodiesel devido à sua disponibilidade abundante e características favoráveis (Vellaiyan, 2024). O processo de transesterificação transforma o óleo de algodão em biodiesel de óleo de algodão, resultando em um combustível com propriedades físico-químicas semelhantes às do diesel convencional (Jamshaid *et al.*, 2022; Vellaiyan, 2023). Esses estudos contribuem não apenas para o avanço científico, mas também para o



desenvolvimento tecnológico, econômico e ambiental, particularmente em regiões como o estado do Rio Grande do Norte, que apresenta diversidade de matérias-primas e elevado potencial para a produção de energia limpa.

Nesse contexto, o objetivo geral deste trabalho foi obter biodiesel por meio da reação de transesterificação via rota metílica e etílica, empregando o óleo de algodão comercializado. Foram avaliados aspectos relacionados à reação de transesterificação, como rendimento, porcentagem de catalisador e tempo reacional. Além disso, o biodiesel produzido foi caracterizado de acordo com parâmetros especificados pela Agência Nacional de Petróleo (ANP), incluindo índice de acidez e índice de iodo, bem como por técnicas de análise espectroscópica, como Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) e Ressonância Magnética Nuclear (RMN).

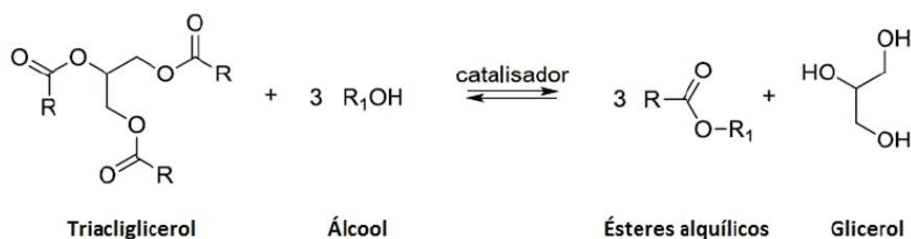
2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 BIODIESEL E SUA SÍNTESE

O biodiesel, regulamentado no Brasil pela Resolução nº 45 da ANP, é um combustível renovável composto por ésteres de ácidos graxos obtidos a partir de óleos vegetais ou gorduras animais. Sua síntese ocorre predominantemente por transesterificação, na qual um mol de triglicerídeo reage com três mols de álcool de cadeia curta (metanol ou etanol), na presença de catalisadores homogêneos ou heterogêneos, formando ésteres (biodiesel) e glicerol como subproduto (Ramos *et al.*, 2011).

Para garantir conversão total em ésteres, é comum utilizar uma razão molar álcool/óleo superior à estequiométrica, como 6:1 para metanol e 9:1 para etanol, conforme descrito na literatura. O processo pode ser ajustado em termos de quantidade de reagentes e condições de reação para otimizar o rendimento do biodiesel. O esquema ilustrado na Figura 1 facilita a compreensão das etapas da reação, destacando a conversão de triglicerídeos em ésteres e glicerol.

Figura 1 - Esquema geral da síntese de biodiesel por transesterificação de óleos vegetais.



Fonte: RAMOS *et al.* (2011).

O biodiesel produzido apresenta vantagens ambientais significativas, como menor emissão de CO₂, SO_x e partículas sólidas em comparação ao diesel fóssil, além de ser biodegradável e de baixa toxicidade (Park *et al.*, 2024).

2.1 MATÉRIAS-PRIMAS PARA BIODIESEL

Diversas oleaginosas são utilizadas como matérias-primas para biodiesel, incluindo soja, girassol, dendê, mamona e algodão, além de fontes de origem animal, como sebo bovino e gorduras de aves e suínos (Zuniga, 2011). A escolha depende de disponibilidade regional, custo, composição química e adequação às normas técnicas.

No Nordeste brasileiro, destaca-se o algodão (*Gossypium*), espécie predominante na região e responsável por grande parte da produção mundial de algodão em caroço (Putti *et al.*, 2012). O óleo de algodão é composto por ácidos graxos livres e pequenas impurezas, que precisam ser removidas durante a purificação, apresentando boa adequação para a produção de biodiesel.

O óleo de algodão ocupa atualmente o terceiro lugar na produção de biodiesel no Brasil, atrás apenas da soja e do sebo (Tomaz *et al.*, 2016). No Nordeste, seu cultivo tem crescido, refletindo aumento da produção, redução de custos e geração de empregos, favorecendo a utilização dessa matéria-prima. Além da importância econômica, o óleo de algodão apresenta vantagens ambientais, como ausência de enxofre e possibilidade de integração com políticas de energias renováveis. Dessa forma, constitui uma alternativa promissora para o avanço tecnológico, econômico e ambiental no Rio Grande do Norte, justificando sua escolha para este estudo.

3. METODOLOGIA

3.1 MATERIAIS

O óleo de algodão refinado foi adquirido no comércio local de Natal e utilizado diretamente nas reações de síntese. As transesterificações foram conduzidas por duas rotas: a metílica, empregando álcool metílico anidro (99,89%, Neon), e a etílica, utilizando álcool etílico anidro (99,89%, Neon), ambas na presença de metóxido de sódio em metanol (30% m/m, Vetec) como catalisador.

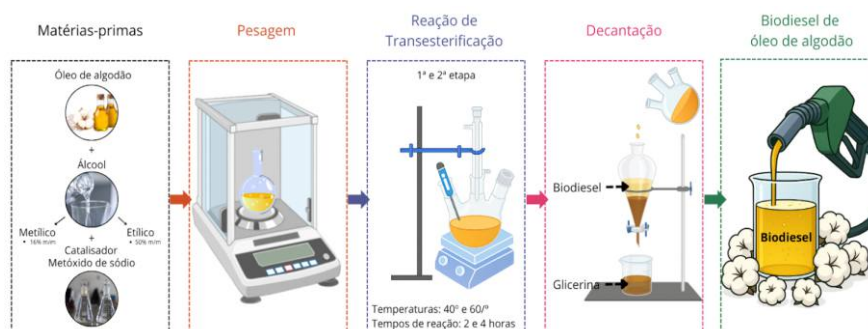
Para as análises de caracterização do biodiesel, utilizaram-se reagentes de grau analítico, entre eles iodeto de potássio (Synth), iodato de potássio, amido solúvel, iodo ressublimado (Isofar), hidróxido de sódio (Vetec) e sulfato de sódio. Em todos os ensaios foi empregada água destilada de alta pureza, obtida em destilador QUIMIS (Modelo PILSON).

3.2 MÉTODOS

Neste estudo as reações de transesterificação foram conduzidas em reator de vidro com capacidade de 500 mL, equipado com condensador de refluxo, aquecimento e agitação magnética. Foram estabelecidas diferentes condições reacionais: concentrações de catalisador de 0,7% e 1,4%, tempos de reação de 2 e 4 horas, e temperaturas de 40 °C e 60 °C. Vale ressaltar que essas condições reacionais pré-estabelecidas foram escolhidas baseadas numa análise sistemática dos resultados encontrados na BOOG *et al.* (2011). O delineamento experimental adotado foi do tipo fatorial completo em 2^N , com N o número de variáveis $N=3$, fatorial 2^3 , totalizando 8 experimentos para cada rota (metílica e etílica).

A reação foi conduzida em duas etapas, adicionando-se inicialmente 80% da mistura álcool/catalisador, e posteriormente os 20% restantes. Após cada etapa, o sistema foi submetido à decantação para separação das fases, resultando em biodiesel (fase menos densa) e glicerina. O biodiesel obtido passou por lavagens sucessivas com água destilada, seguido de secagem em banho-maria a 60 °C para remoção de resíduos de álcool e água. Por fim, as amostras foram acondicionadas em frascos de vidro âmbar, mantidos à temperatura ambiente até as análises.

Figura 2 - Fluxograma da metodologia de produção do biodiesel



FONTE: Autores (2025).

3.3 TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO

Após a síntese, o biodiesel obtido foi submetido a diferentes análises com o objetivo de avaliar sua qualidade, rendimento e conformidade com as normas técnicas vigentes. Essas avaliações permitiram verificar a eficiência do processo de transesterificação, identificando possíveis impurezas, presença de glicerol residual, ácidos graxos livres e outras substâncias que poderiam afetar as propriedades físico-químicas do combustível.

3.3.1 Rendimento do Biodiesel

O rendimento do biodiesel foi determinado pela razão do peso do biodiesel produzido, após a reação, e o peso do óleo inicial, empregada na reação de transesterificação multiplicada pela porcentagem total (%).

3.3.2 Índice de Acidez

O índice de acidez, parâmetro importante para o controle de qualidade de óleos, gorduras e biodiesel, é expresso em mg de KOH por grama de amostra e é determinado por titulação com solução padronizada de hidróxido de potássio. Antes da análise, as amostras de biodiesel foram secas com 10% de sulfato de sódio anidro, aquecidas a 50°C com agitação, filtradas a quente e armazenadas. A determinação do índice de acidez foi realizada por titulação com indicador visual (fenolftaleína), seguindo o método adaptado da AOCS Cd 3d-63, utilizando solventes menos tóxicos, conforme Tubino e Aricetti (2011). Aproximadamente 20g da amostra foram misturadas com etanol 50% e tituladas com NaOH 0,02molL⁻¹ até obtenção da coloração rosa, realizando-se também um branco para correção. O índice de acidez foi calculado conforme a equação descrita no método (Tubino & Aricetti, 2011).

3.3.3 Índice de Iodo

As determinações do índice de iodo das amostras de biodiesel foram realizadas pelo método modificado de Friedmann e Aricetti (2009). Para isso, aproximadamente 0,1g de biodiesel foram pesados e dissolvidos em 15mL de álcool etílico, sob agitação magnética por 2 minutos. Após a completa solubilização, adicionaram-se 20mL de solução etanólica de iodo 0,1molL⁻¹, mantendo-se a agitação, seguida da adição de 200mL de água destilada gelada. A agitação foi reduzida para lenta, mantendo a solução em repouso por mais 5 minutos. Em seguida, realizou-se a titulação com solução padronizada de tiosulfato de sódio 0,1 molL⁻¹ até a solução adquirir coloração levemente amarela; em seguida, adicionaram-se 3mL de solução de amido, observando-se a coloração azul característica. A titulação continuou até o desaparecimento da cor azul, momento em que o ponto final foi caracterizado por uma coloração branca leitosa. Todas as titulações foram realizadas acompanhadas de um branco para correção.

3.3.4 Espectroscopia no infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)

As amostras de biodiesel foram caracterizadas por espectroscopia no Infravermelho Médio com Transformada de Fourier (FTIR), técnica amplamente utilizada para identificar os modos vibracionais das ligações químicas e analisar a composição molecular do combustível (Oliveira *et al.*, 2006). Os espectros foram registrados em um espectrofotômetro FTIR IR-Prestige-21 (Shimadzu, Tóquio, Japão), utilizando a técnica de reflectância total atenuada (ATR), na faixa de 700 a 5000 cm⁻¹, com resolução de 4 cm⁻¹ e 20 varreduras por amostra.

3.3.5 Análise por espectrometria de Ressonância Magnética Nuclear (RMN)

O teor de ésteres metílicos e etílicos no biodiesel foi determinado por ressonância magnética nuclear de próton (¹H-NMR), seguindo Gelbard *et al.* (1995). A conversão em ésteres foi calculada a partir da razão entre a área dos prótons da

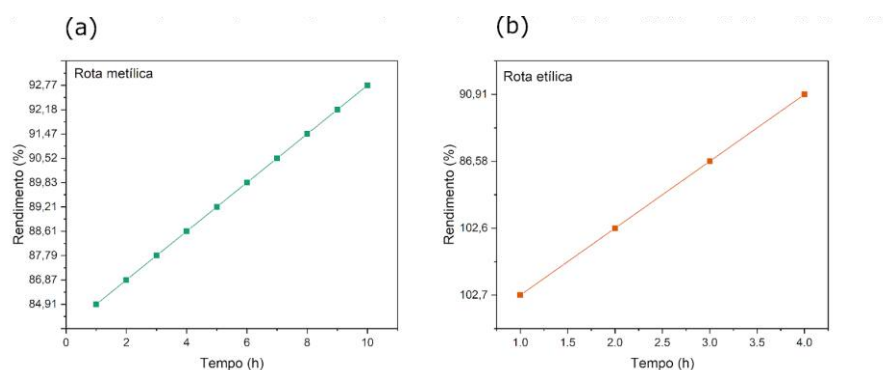
metila ligada à carboxila ($\text{CH}_3\text{OCO}-$) e dos prótons metilênicos α -carbonílicos ($-\text{OCOCH}_2-$), multiplicada pelo fator $2/3$, correspondente à proporção de hidrogênios envolvidos. Para os espectros, $200\ \mu\text{L}$ de cada amostra foram dissolvidos em $600\ \mu\text{L}$ de CDCl_3 com TMS e analisados em triplicata em um espectrômetro Bruker Avance III 500 MHz, utilizando sequência de pulso zg30, janela espectral de $-4,00$ a $16,00$ ppm, 16 varreduras e pulso calibrado de 90° .

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 RENDIMENTO DO BIODIESEL

Na Figura 3, são apresentados os resultados das amostras de biodiesel de algodão metílico e etílico, obtidos com o objetivo de representar quantitativamente o processo reacional, evidenciando os valores de rendimento dos triglicerídeos em monoésteres metílicos, bem como características importantes observadas durante a reação de transesterificação.

Figura 3 - Rendimento do biodiesel obtido pelas rotas metílica (a) e etílica (b).



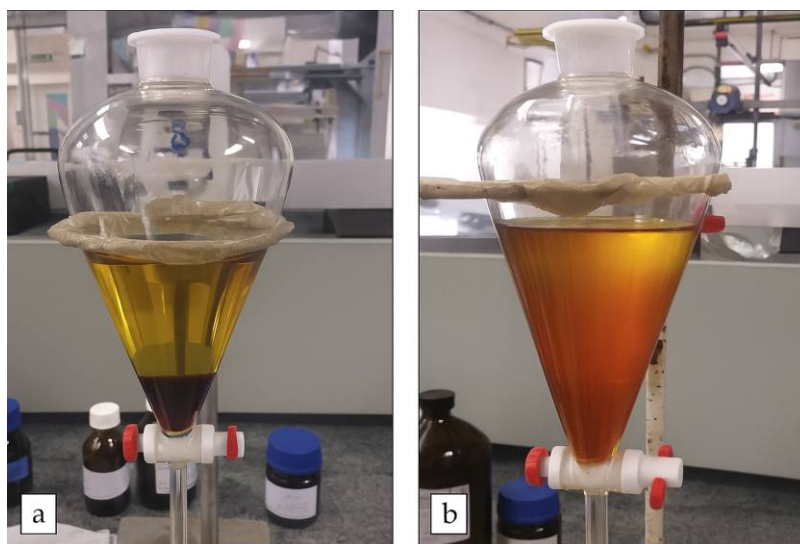
FONTE: Autores (2018).

Como pode ser observado na Figura 3-a, os rendimentos obtidos foram inferiores a 96% nos quatro experimentos realizados a uma temperatura próxima de $60\ ^\circ\text{C}$ na rota metílica. Esse comportamento pode ser justificado pela maior reatividade do metanol nessa condição, que favorece a conversão dos triglicerídeos. Outro aspecto relevante é a facilidade de separação das fases entre os ésteres metílicos (biodiesel) e a glicerina nessa temperatura, resultando em um produto final mais límpido e com menor formação de emulsões, o que simplifica a etapa de purificação (Figura 4-a).

Por outro lado, nos experimentos conduzidos a $40\ ^\circ\text{C}$ observou-se maior dificuldade na separação entre as fases biodiesel/glicerina, o que prolongou significativamente o processo de purificação e resultou em rendimentos ligeiramente

menores em comparação aos obtidos a 60 °C. Contudo, tais valores de rendimento não refletem com precisão a eficiência da reação nessa condição, uma vez que, juntamente com os ésteres metílicos, podem estar presentes subprodutos de saponificação (Figura 4-b).

Figura 4 - Etapa de decantação do biodiesel preparado com álcool metílico a 60°C (a) e 40°C (b).



FONTE: Autores (2018).

A Figura 4 evidencia que, partindo das mesmas condições iniciais de massa de óleo de algodão, tempo reacional e concentração de catalisador, o aumento da temperatura favorece a formação de uma fase mais rica em ésteres metílicos. Essa tendência está diretamente associada à composição do óleo de algodão, que contém mais de 80% de ácidos graxos insaturados, principalmente oleico e linoleico. Esses ácidos possuem cadeias longas e insaturações que intensificam as forças de interação intermoleculares (forças de Van der Waals). O aquecimento a 60 °C contribui para o enfraquecimento dessas interações, permitindo uma maior interação entre os triglicerídeos, o metanol e o catalisador, o que torna a reação de transesterificação mais eficiente nessa temperatura.

Diante das observações experimentais, verificou-se que o parâmetro de maior influência na rota metílica foi a temperatura, enquanto o tempo de reação e a porcentagem de catalisador não apresentaram efeito tão significativo sobre o rendimento. Dessa forma, os experimentos da rota etílica foram conduzidos apenas a 60 °C, uma vez que essa temperatura se encontra abaixo do ponto de ebulição do etanol (78,3 °C), evitando perdas por volatilização. Nessa condição, foram realizados quatro experimentos, variando-se apenas o tempo de reação e a porcentagem de catalisador.

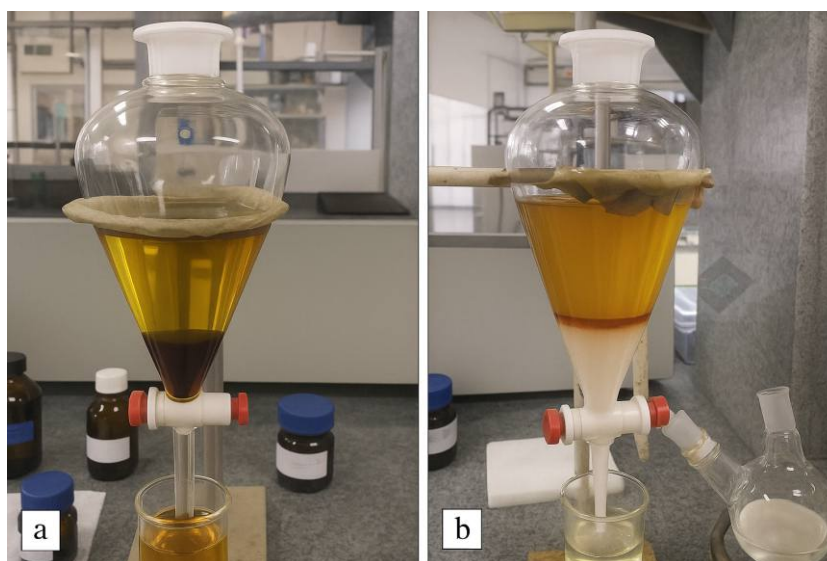
Na Figura 3-b, são apresentados os resultados obtidos para a rota etílica, cujos rendimentos ficaram acima de 86%. Entretanto, os quatro experimentos realizados apresentaram dificuldades operacionais significativas, tais como formação de emulsões, dificuldade de separação da glicerina e maior complexidade

na etapa de purificação do biodiesel. Essas limitações resultaram em um tempo total de processo consideravelmente maior para a etanolíse em comparação à metanolíse.

A separação da glicerina do biodiesel foi observada apenas ao final da segunda etapa da transesterificação e mediante a adição de sucessivas porções de água destilada. Essa dificuldade de separação, associada à presença de subprodutos, sugere que os rendimentos calculados acima de 100% podem estar superestimados, em razão da presença de glicerina residual, etanol, água e catalisador dispersos no produto final.

Nas Figuras 5-a e 5-b, é possível visualizar a dificuldade de decantação da glicerina durante a rota etílica a 60 °C, com razão molar etanol/óleo de 9:1. Observa-se a presença da glicerina tanto na parte superior quanto inferior do funil de separação, bem como a formação de sabão ao longo das lavagens com água destilada. Esses resultados evidenciam que a conversão completa de triglicerídeos em ésteres etílicos e glicerina não foi alcançada nessas condições reacionais. Caso a etapa de lavagem não seja suficientemente eficiente para remover a glicerina residual, o biodiesel obtido pode apresentar sérios problemas operacionais, como entupimento de filtros, deposição de glicerol no tanque e falhas no processo de combustão.

Figura 5 - Etapa de decantação do biodiesel preparado com álcool etílico a 60 °C (a) e após lavagem (b).



FONTE: Autores (2018).

De maneira geral, os resultados indicam que, tanto na rota metílica quanto na etílica, a conversão final não foi significativamente influenciada pela variação do tempo de reação e da porcentagem de catalisador. Entretanto, do ponto de vista econômico e prático, é importante otimizar esses parâmetros, de modo a atingir rendimentos satisfatórios com o menor custo operacional. Com base nos dados obtidos, sugere-se o emprego de 0,7% de catalisador e um tempo reacional de 2 horas como condições adequadas para a síntese de biodiesel de algodão.

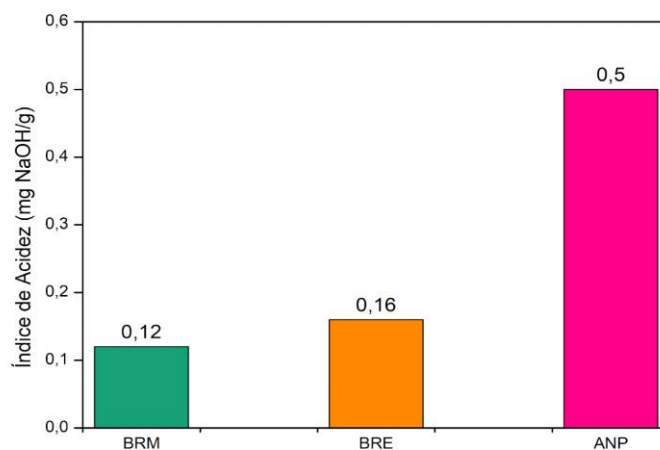
4.2 ÍNDICE DE ACIDEZ

A determinação do índice de acidez é uma análise fundamental para avaliar a qualidade do biodiesel, pois está diretamente relacionada à quantidade de ácidos graxos livres (AGL) presentes na amostra. Esse índice corresponde à massa de NaOH ou KOH, expressa em miligramas de base por grama de amostra, necessária para neutralizar os AGL. Assim, elevados valores de acidez indicam maior presença de AGL, o que pode comprometer tanto a eficiência da reação de transesterificação quanto a qualidade final do biodiesel.

O índice de acidez do óleo de partida exerce influência significativa no processo, já que níveis elevados consomem parte do catalisador alcalino, favorecendo a formação de sabão e dificultando a separação das fases, com consequente redução do rendimento. De acordo com Muller *et al.* (2013), para garantir boa eficiência da reação, o índice deve ser mantido baixo. No Brasil, a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) estabelece o limite máximo de 0,5 mg KOH g⁻¹ para biodiesel puro (ASTM D974).

Os valores de índice de acidez obtidos neste trabalho para o biodiesel da rota metílica (BRM) e da rota etílica (BRE), ambos provenientes do óleo de algodão (experimento 8), variaram entre 0,12 e 0,16 mg NaOHg⁻¹ (Figura 6). Estes valores estão bem abaixo do limite especificado pela ANP e também em conformidade com as normas europeias (EN 14214), confirmando a boa qualidade dos produtos obtidos.

Figura 6 - Índice de acidez do biodiesel de algodão produzido empregando as rotas metílicas e etílicas.



FONTE: Autores (2018).

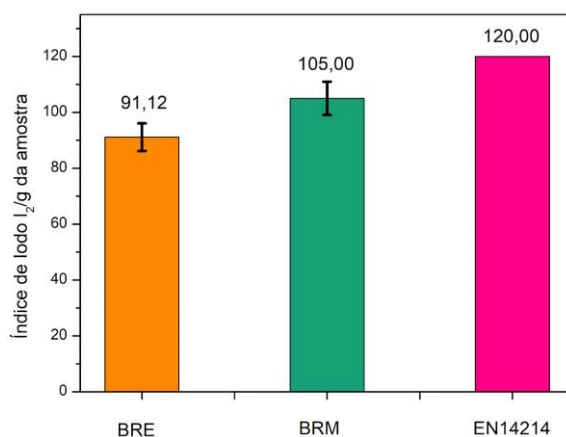
Observou-se que a rota metílica resultou no menor índice de acidez, indicando maior conversão dos AGL em ésteres e reduzida formação de sabão, o que se refletiu em uma separação de fases mais limpa. Por outro lado, na rota etílica, verificou-se um índice de acidez ligeiramente mais elevado, o que está associado a uma maior ocorrência de saponificação e, consequentemente, a uma maior dificuldade de separação dos produtos.

Quando comparados aos valores reportados na literatura, os resultados obtidos se mostraram consistentes. Rashid *et al.* (2009) reportaram para o biodiesel de óleo de algodão via metanol um índice de acidez de $0,16 \text{ mg KOHg}^{-1}$, em concordância com os resultados deste estudo. Para a rota etílica, Gabriel (2010) encontrou valores de $0,40 \text{ mg KOHg}^{-1}$, superiores aos aqui observados, evidenciando que, embora a rota etílica tenda a apresentar maior acidez, o processo experimental aplicado neste trabalho conseguiu reduzir esse valor de forma significativa. Dessa forma, pode-se concluir que os resultados obtidos confirmam a viabilidade do uso do óleo de algodão na produção de biodiesel, destacando-se a rota metílica como a mais eficiente no que se refere ao controle da acidez e à prevenção da formação de sabões, garantindo maior rendimento e qualidade do combustível.

4.3 ÍNDICE DE IODO

O índice de iodo corresponde à medida do grau de insaturação presente nos óleos e gorduras, sendo característico de cada matéria-prima. Esse parâmetro é amplamente utilizado no estudo da rancidez oxidativa e na avaliação da estabilidade química de diferentes combustíveis. Amostras com maior número de ligações duplas tendem a apresentar maior suscetibilidade à polimerização, o que reduz sua estabilidade durante o armazenamento e utilização. Normas internacionais estabelecem limites de qualidade do biodiesel em relação a esse parâmetro, como a Norma Europeia EN 14214, que define o valor máximo de $120 \text{ gI}_2/100 \text{ g}$ de amostra. Os índices de iodo obtidos para o biodiesel da rota metílica (BRM) e para o biodiesel da rota etílica (BRE), ambos produzidos de acordo com as condições reacionais do Experimento 8, estão apresentados na Figura 7. As análises foram realizadas em duplicata, garantindo maior confiabilidade aos resultados obtidos.

Figura 7 - Índice de iodo do biodiesel de algodão produzido empregando as rotas metílicas e etílicas.



FONTE: Autores (2018).

Os resultados indicam que as amostras de biodiesel produzidas pelas rotas metílica e etílica apresentaram índices de iodo de $91,12\text{gI}_2/100\text{g}$ e $105,00\text{gI}_2/100\text{g}$, respectivamente. Esses valores estão abaixo do limite máximo de $120\text{gI}_2/100\text{g}$ estabelecido pelas normas EN 14214 para combustíveis padrão. Segundo Lobô e colaboradores (2009), o índice de iodo é um parâmetro útil para a determinação do grau geral de insaturação, o qual influencia propriedades como viscosidade e ponto de névoa do biodiesel. Dessa forma, quanto menor o índice de iodo, maior tende a ser a estabilidade oxidativa do combustível, refletindo em melhor desempenho durante o armazenamento e utilização.

Em comparação com valores reportados na literatura, Duarte (2009) encontrou um índice de iodo de $117,7\text{gI}_2/100\text{g}$ para o biodiesel de óleo de algodão obtido pela rota metílica utilizando o método EN 14111. Já Gabriel (2010) reportou para a rota etílica um valor de $111,27\text{gI}_2/100\text{g}$. Nesse contexto, os resultados obtidos neste trabalho para a rota metílica apresentam maior proximidade com os valores da literatura e encontram-se dentro do limite estabelecido pelas normas internacionais. Para a rota etílica, observou-se uma diferença em relação aos valores relatados por Gabriel (2010), possivelmente associada à utilização de diferentes metodologias analíticas. Contudo, mesmo com essa variação, os índices de iodo encontrados neste estudo permanecem em conformidade com a especificação máxima de $120\text{gI}_2/100\text{g}$ da EN 14214, não comprometendo a qualidade do biodiesel produzido.

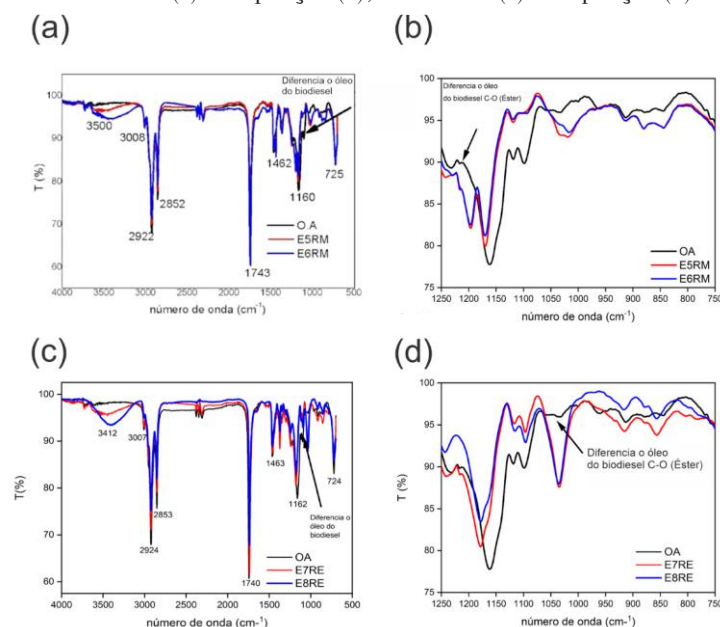
4.4 ESPECTROSCOPIAS NO INFRAVERMELHO COM TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR)

A espectroscopia no infravermelho mede as transições vibracionais que ocorrem quando uma molécula absorve radiação nessa região do espectro eletromagnético. Cada grupo funcional apresenta frequências e intensidades de absorção características, o que torna a técnica uma ferramenta eficaz para o monitoramento e controle da reação de transesterificação (Duarte, 2009). A Figura 8 (a-d) apresenta os espectros na região do infravermelho médio do óleo de algodão e dos biodieseis obtidos pelas rotas metílica e etílica, permitindo a comparação entre as bandas características dos triglicerídeos e dos ésteres metílicos e etílicos de ácidos graxos.

Os espectros de infravermelho dos biodieseis metílicos (Figura 8 a-b) e etílicos (Figura 8 c-d) apresentaram elevada similaridade com os do óleo de algodão, em razão da proximidade estrutural entre triacilglicerídeos e ésteres de ácidos graxos. As principais bandas de absorção identificadas nas amostras foram estiramento C-H de alceno em 3008cm^{-1} , estiramento C-H₂ de alcano em 2922 e 2852cm^{-1} , estiramento da carbonila C=O em 1743cm^{-1} , deformação angular de C-H de alcano em 1462cm^{-1} , estiramento da ligação C-O de éster em 1160cm^{-1} e deformação angular assimétrica de C-H em 725cm^{-1} , característica de cadeias

longas de hidrocarbonetos $(CH_2)_n$. A banda larga observada entre 2500 e 3300 cm^{-1} indicou a presença de umidade residual nas amostras.

Figura 8 - Espectros FTIR do óleo de algodão e das amostras de biodiesel: rota metílica (a) e ampliação (b); rota etílica (c) e ampliação (d).



FONTE: Autores (2018).

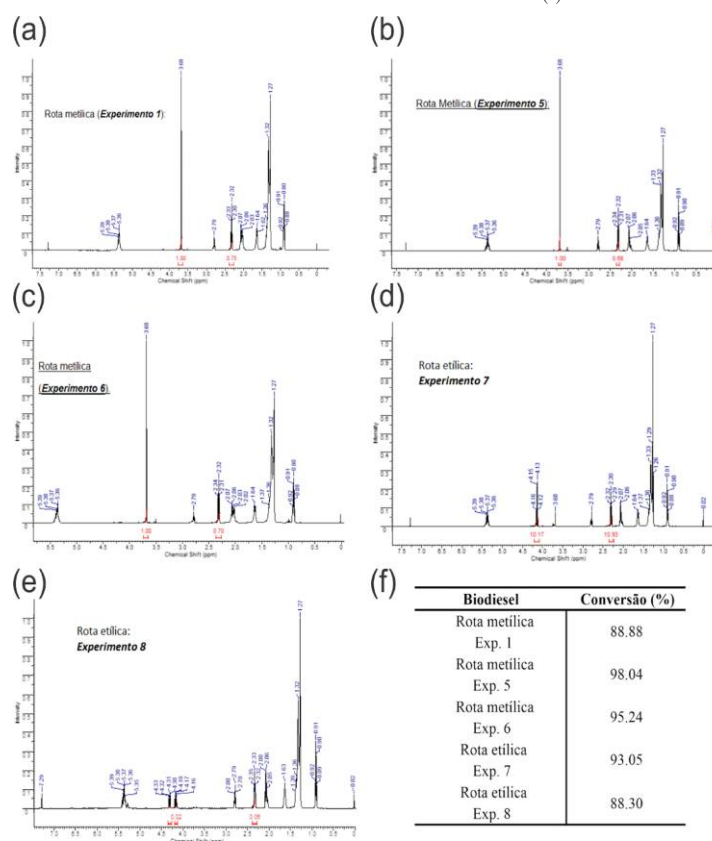
Além disso, deslocamentos discretos em torno de $1160cm^{-1}$, quando comparados óleo e biodiesel, evidenciam modificações nos estiramentos C-O de éster, associadas ao processo de transesterificação. Tanto os biodieseis metílicos quanto os etílicos exibiram padrões de absorção equivalentes, confirmando que a substituição do radical metílico pelo etílico não altera de modo significativo as principais características espectroscópicas.

4.5 ANÁLISE POR ESPECTROMETRIA DE RESSONÂNCIA MAGNÉTICA NUCLEAR (RMN)

Com o objetivo de confirmar e quantificar a conversão dos triglicerídeos em ésteres metílicos e etílicos, foram obtidos espectros de RMN de 1H das amostras produzidas (Figura 19 (a-e)). Nos espectros de RMN de 1H dos ésteres metílicos, observam-se deslocamentos químicos característicos que os diferenciam dos triglicerídeos presentes no óleo de algodão. Segundo Silva *et al.* (2015) a conversão é facilmente identificada pela técnica de RMN devido o desaparecimento dos sinais atribuídos aos hidrogênios do glicerol, os duplos dupletos referentes aos hidrogênios dos grupos CH_2 (4,30 e 4,15 ppm) e o sinal do hidrogênio do grupo CH (5,26 ppm). Simultaneamente, surge um singleto em 3,68 ppm, associado aos hidrogênios do grupo metóxi ($-OCH_3$) proveniente do metanol, caracterizando a formação dos ésteres metílicos. Esse singleto foi identificado nos espectros das amostras provenientes dos experimentos 1, 5 e 6 da rota metílica (Figura 9 (a-c)).

A Figura 9 (d-e) apresenta os espectros de RMN de ^1H dos biodieseis obtidos pela rota etílica. Nesses casos, observa-se o surgimento de quartetos na região de 4,12 a 4,32 ppm, atribuídos aos prótons do grupo CH_2 etoxílico ($-\text{OCH}_2-$), cuja presença é indicativa da formação dos ésteres etílicos. Esses sinais diferenciam claramente os espectros da rota etílica daqueles da rota metílica, confirmando a obtenção dos respectivos monoalquil ésteres. Os valores de conversão obtidos para ambas as rotas encontram-se sumarizados na tabela apresentada na Figura 9 (f).

Figura 9 - RMN das amostras de biodiesel: rota metílica (a-c), rota etílica (d-e) e tabela com resultados de conversão (f).



FONTE: Autores (2018).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados mostraram que o óleo de algodão é uma matéria-prima viável para produção de biodiesel, atendendo aos parâmetros de qualidade exigidos pelas normas técnicas. A rota metílica apresentou melhor desempenho em termos de rendimento, separação de fases e controle de acidez, enquanto a rota etílica, embora tenha gerado produtos dentro das especificações, apresentou maior complexidade operacional. Conclui-se que, nas condições estudadas, a rota metílica se mostra mais adequada para aplicações práticas e econômicas.

REFERÊNCIAS

ANP. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/wwwanp/biocombustiveis/biodiesel>. Acesso em: 27 setembro. 2025.

ARICETTI, J. A. et al. A simple green method for biodiesel iodine number determination. *Journal of ASTM International*, v. 7, n. 1, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1520/JAI102516>

BOOG, J. H. F. et al. Determining the residual alcohol in biodiesel through its flash point. *Fuel*, v. 90, p. 905-907, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.10.020>

CASTRO, Luciene da Silva; BARAÑANO, Audrei Giménez. Produção de biodiesel, métodos, perspectivas para o Brasil - uma revisão. *Revista Liberato*, [S.l.], v. 20, n. 33, p. 41-56, 2019. DOI: <https://doi.org/10.31514/rliberato.2019v20n33.p41>.

DUARTE, Amanda Gondim. Avaliação da estabilidade térmica e oxidativa do biodiesel de algodão e do efeito da adição de antioxidantes (α -tocoferol e BHT). 2009. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2009.

GABRIEL, M. R. F. Cardenol e Eugenol modificados: uso como antioxidante no controle do processo oxidativo do biodiesel de algodão. 2010. Tese (Doutorado em Química) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2010.

GELBARD, G.; BRES, O.; VARGAS, R. M.; VIELFAURE, F.; SCHUCHARDT, U. ¹H Nuclear magnetic resonance determination of the yield of the transesterification of rapeseed oil with methanol. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, v. 72, p. 1239-1241, 1995. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02540998>

JAMSHAD, M.; MASJUKI, H. H.; KALAM, M. A.; ZULKIFLI, N. W. M.; ARSLAN, A.; QURESHI, A. A. Experimental investigation of performance, emissions and tribological characteristics of B20 blend from cottonseed and palm oil biodiesels. *Energy*, [S.l.], v. 239, p. 121894, jan. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121894>.

KITTUR, M. I.; ANDRIYANA, A.; ANG, B. C.; CH'NG, S. Y.; MUJTABA, M. A. Swelling of rubber in blends of diesel and cottonseed oil biodiesel. *Polymer Testing*, [S.l.], v. 96, p. 107116, abr. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2021.107116>.

KROZER, Y. Energy resources and pollution. In: KROZER, Y. *Economics of Renewable Energy*. Cham: Springer, 2022. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-90804-1_2.

LELIEVELD, J. et al. Effects of fossil fuel and total anthropogenic emission removal on public health and climate. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, v. 116, n. 15, p. 7192-7197, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1819989116>.

LÔBO, I. P.; FERREIRA, S. L. C.; CRUZ, R. S. Biodiesel: parâmetros de qualidade e métodos analíticos. *Química Nova*, São Paulo, v. 32, n. 6, p. 1596-1608, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422009000600044>.

OLIVEIRA, J. S. et al. Determination of methyl ester contents in biodiesel blends by FTIR-ATR and FTNIR spectroscopies. *Talanta*, v. 69, n. 5, p. 1278-1284, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2006.01.002>

PARK, G.; CHOI, D.; KIM, J. Y.; JUNG, S.; TSANG, Y. F.; KWON, E. E. Direct conversion of cottonseeds into biodiesel. *Chemical Engineering Journal*, [S.l.], v. 493, p. 152491, ago. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.152491>.

PUTTI, F. F.; SILVA, A. P.; CARVALHO, L. M. Análise da viabilidade da produção de biodiesel a partir do uso do algodão. *Fórum Ambiental da Alta Paulista*, Votuporanga, v. 8, n. 7, p. 127–142, dez. 2012. DOI: 10.17271/19800827872012336. Disponível em: <https://doi.org/10.17271/19800827872012336>.

RIBEIRO, Vinícius Souza; SILVA, Mônica Aparecida da Rocha. Política pública do biodiesel no Brasil: uma análise na perspectiva do ciclo das políticas públicas. *DRd – Desenvolvimento Regional em Debate*, v. 10, p. 833-861, 2020.

SANTOS, Marcos Eduardo Melo dos; CASTRO, Rui; COSTA, Hirdan. Contradictory electric energy policies and its impacts on the renewability of the electric matrix: Brazil as a case study. *Heliyon*, [S.l.], v. 9, n. 10, p. e19309, out. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19309>.

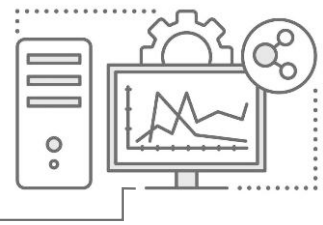
TOMAZ, R. M. A. G.; ERISMANN, N. de M.; CIA, E.; KONDO, J. I.; FUZZATTO, M. G.; CARVALHO, C. R. L. Teor de óleo e composição de ácidos graxos em sementes de diferentes genótipos de algodoeiro. *Brazilian Journal of Food Technology*, Campinas, v. 19, p. e2015071, set. 2016. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/bjft/a/DkTg7fZZSM6Ks5qMBwN7B3g/>.

TUBINO, M.; ARICETTI, J. A. A green method for determination of acid number of biodiesel. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, Campinas, v. 22, n. 6, p. 1073-1081, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-50532011000600011>

VELLAIYAN, S. Experimental study on energy and environmental impacts of alcohol-blended water emulsified cottonseed oil biodiesel in diesel engines. *Results in Engineering*, [S.l.], v. 24, p. 102873, dez. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102873>.

VELLAIYAN, S. Recent advancements in water emulsion fuel to explore efficient and cleaner production from various biodiesels: a retrospective review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [S.l.], v. 187, p. 113704, nov. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113704>.

ZUNIGA, A. D. G. et al. Revisão: Propriedades físico-químicas do biodiesel. Pesticidas: *Revista de Ecotoxicologia e Meio Ambiente*, v. 21, p. 55–72, jan./dez. 2011. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/pesticidas/article/view/25939>.



CAPÍTULO 6

DOI: 10.63951/synapse978-65-88890-61-5_6

FILIPPE FERREIRA¹
BRÁULIO BATISTA SOARES¹
BRISMARK GÓES DA ROCHA¹

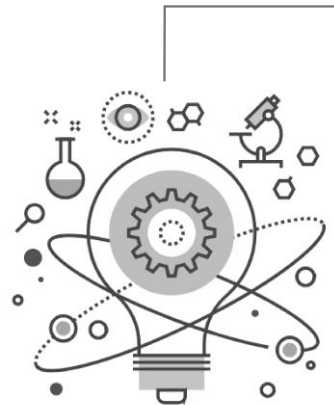
DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA SOLAR E EÓLICA PARA RESIDÊNCIAS

Resumo

O crescimento da utilização de energia elétrica e os impactos ambientais associados às fontes tradicionais impulsionam a busca por fontes renováveis, como a solar e a eólica. Contudo, consumidores encontram dificuldades em determinar qual sistema é mais eficiente e adequado para suprir suas demandas energéticas, considerando espaço disponível, demanda de consumo e eficiência dos equipamentos. Este estudo teve como objetivo identificar a fonte mais apropriada entre sistemas on-grid solares e eólicos para uso residencial, analisando recursos energéticos, dimensionando a quantidade de módulos fotovoltaicos e aerogeradores necessários e avaliando a eficiência prática em diferentes perfis de consumo. A metodologia foi estruturada em duas etapas: exploratória, com coleta de dados de irradiação solar, velocidade média dos ventos e perfis de consumo em três residências de Natal/RN; e experimental, com dimensionamento técnico dos sistemas considerando eficiência, espaço e consumo. Os resultados mostraram que, para Lagoa Nova (345 kWh/mês), foram necessários 4 painéis fotovoltaicos (10,53 m²) contra 6 aerogeradores (108,3 m²). Na Redinha (253 kWh/mês), o sistema solar exigiu 3 painéis (7,75 m²) e o eólico 4 aerogeradores (54,14 m²). Já em Bom Pastor (177 kWh/mês), 2 painéis (5,16 m²) foram suficientes, enquanto o sistema eólico necessitou de 3 aerogeradores (54,15 m²). Dessa forma, conclui-se que a energia solar se mostra mais viável para residências, pois ocupa menor área e requer menor quantidade de equipamentos em comparação ao sistema eólico.

Palavras-chave: energia eólica; energia solar; geração elétrica on-grid em residências; dimensionamento eólico; dimensionamento solar

¹ Universidade do Estado do Rio Grande do Norte



Abstract

The growth in electricity consumption and the environmental impacts associated with traditional sources have driven the search for renewable sources, such as solar and wind energy. However, consumers face difficulties in determining which system is more efficient and suitable to meet their energy demands, considering available space, consumption levels, and equipment efficiency. This study aims to identify the most appropriate source between on-grid solar and wind systems for residential use by analyzing energy resources, sizing the number of photovoltaic panels and wind turbines required, and evaluating practical efficiency across different consumption profiles. The methodology was structured in two stages: exploratory, involving data collection on solar irradiation, average wind speed, and energy consumption profiles in three residences in Natal/RN; and experimental, involving technical sizing of the systems considering efficiency, space, and daily consumption. Results showed that for Lagoa Nova (345 kWh/month), 4 solar panels (10.53 m²) were required versus 6 wind turbines (108.3 m²). In Redinha (253 kWh/month), the solar system required 3 panels (7.75 m²) and the wind system 4 turbines (54.14 m²). In Bom Pastor (177 kWh/month), 2 panels (5.16 m²) were sufficient, while the wind system required 3 turbines (54.15 m²). It is concluded that solar energy is more viable for residential use, as it occupies less space and requires fewer devices compared to wind systems.

Keywords: *wind energy; solar energy; on-grid electricity generation in residences; wind system sizing; solar system sizing*

INTRODUÇÃO

O crescimento da utilização da energia elétrica impulsiona a busca por novas fontes limpas de energia elétrica. No entanto, as tradicionais fontes de energia elétrica, como usinas hidrelétricas, termelétricas, petróleo e usinas nucleares, são predominantes.

Diante disso, a transição para fontes de energias renováveis pode ser essencial para o Brasil. Conforme Mesquita (2022), as mudanças climáticas e os consequentes acordos assinados para a diminuição do impacto humano no aquecimento do planeta podem agir como um estímulo para aceleração da transição energética, pois o aquecimento global é um efeito das emissões de gases do efeito estufa. Muitas dessas emissões estão associadas à geração de energia elétrica a partir de fontes como: termelétrica e petróleo (Mesquita, 2022).

Assim sendo, a necessidade da transição para fontes de energias renováveis tem relevância na busca por fontes energéticas que geram menos gases de efeito estufa a fim de diminuir a poluição ao meio ambiente e os impactos à atmosfera (Lima; Hamzagic, 2022). As fontes renováveis de energia são aquelas consideradas inesgotáveis, que podemos utilizar continuamente, pois sempre se renovam. Alguns exemplos são a energia solar, hidrelétrica, eólica e biomassa (Villalva, 2015). A energia solar, proveniente do sol, é uma fonte renovável ao longo das escalas de tempo, sendo uma das alternativas energéticas mais promissoras para promover a energia necessária ao desenvolvimento humano e industrial (Pinho; Galdino, 2014).

As fontes de energia renováveis, como a solar e a eólica, têm se destacado como alternativas viáveis e sustentáveis. Com o aumento da utilização dessas fontes, os custos relacionados a elas têm diminuído consideravelmente (Kalogirou, 2016). De acordo com Villalva (2015), a adoção dessas fontes de energia alternativas tem levado seus valores a se aproximarem dos preços da energia gerada por fontes tradicionais. Um dos principais obstáculos enfrentados pelos consumidores ao considerar a opção de sistemas de energia solar ou eólica em sua residência é a falta de acesso a dados específicos e informações claras sobre qual dos sistemas é mais eficiente para residência. Apesar de conhecermos os benefícios ambientais dessas fontes de energia, a ausência de orientação sobre a escolha entre os sistemas, solar ou eólica, pode dificultar a decisão pelo melhor. Assim sendo, o objetivo do estudo é analisar qual o sistema on-grid de energia, solar ou eólica, é considerada a melhor escolha para residência em áreas urbanas, considerando a demanda necessária de energia elétrica da residência, o espaço necessário para instalação e a eficiência do sistema.

A falta de disponibilidade de informações precisas e específicas sobre a eficiência de cada sistema de energia solar e eólica é um obstáculo relevante para que o cliente saiba escolher o melhor sistema para a sua residência, embora seja

bastante reconhecido que ambas as fontes de energia podem ajudar a diminuir o impacto do aquecimento global e a redução do custo com a energia elétrica, além de poder aumentar o conforto na residência, deixar de utilizar o gás butano para cozimento, dentre outros. Sendo assim, é fundamental saber identificar o melhor sistema para a residência, sem esses conhecimentos os usuários poderão não realizar a escolha adequada. Portanto, este estudo apresenta os fatores mais relevantes que podem ser considerados na escolha entre os sistemas de energia solar ou eólica em residência, por meio dessas análises, contribui-se para que o usuário possa fazer a melhor escolha dentre os sistemas citados.

Este capítulo está organizado em quatro partes. Na introdução, apresentamos a contextualização para ter uma ideia clara sobre o tema do trabalho, além das considerações que justificam a sua realização e a apresentação dos objetivos; trazemos, na segunda parte, a fundamentação teórica que detalha os conceitos introduzidos, como: recurso eólico, recurso solar, energia eólica, potência do vento, recurso solar, potência solar. Na terceira parte, apresentamos os elementos necessários para a realização do trabalho, bem como o levantamento dos níveis de irradiação solar e a velocidade do vento, além da escolha do módulo fotovoltaico e do aerogerador que foram utilizados. A quarta parte compreende os resultados e a discussão onde constam as conclusões obtidas com as respectivas análises. Por fim, na última parte, constam as considerações finais do estudo, apontando seus achados e suas possíveis lacunas que poderão direcionar trabalhos futuros.

2. RECURSO EÓLICO

A energia eólica é originada pelo vento, que, por sua vez, resulta da radiação solar. A radiação solar provoca o movimento dos fluxos de ar, gerando os ventos. A energia gerada pelo vento que atinge a superfície terrestre é de aproximadamente $1,39 \text{ kW/m}^2$, sendo convertida em energia cinética. Além disso, os ventos são causados pelo aquecimento diferencial da atmosfera. Vale ressaltar que parte da energia solar e da radiação solar que atingem a superfície terrestre são dispersas pela atmosfera (Hodge, 2011).

O aquecimento diferenciado da atmosfera provoca aquecimento de forma desigual na superfície da Terra em regiões do equador e polares. Assim, a massa de ar quente que se encontra nas baixas altitudes de regiões do equador tende a subir, sendo substituída por uma massa de ar frio que se desloca das regiões polares,

causando o movimento das massas de ar (Hodge, 2011). Se o planeta não mantivesse seu movimento de rotação, o ar se deslocaria diretamente até as calotas polares, esfriaria, desceria e retornaria a linha do equador pelas camadas mais baixas da atmosfera. No entanto, a rotação da terra gera o chamado efeito de coriolis, que altera essa trajetória do fluxo de ar (Amêndola, 2007).

A força de coriolis, provocada pela rotação da terra, não causa apenas modificação da trajetória do fluxo de ar, mas também afeta tanto a velocidade quanto a direção do vento e essa força faz com que os ventos apresentem movimentos tipicamente circulares ou em espiral em torno dos centros de pressão, contribuindo para as mudanças na trajetória das massas de ar entre o equador e os polos (Hodge, 2011).

A incidência dos raios solares e o Efeito de Coriolis apresentam diferentes medidas de pressão na atmosfera (Amêndola, 2007, p.51):

- Baixa pressão na região do Equador - aquecimento do ar;
- Alta pressão nos Polos - resfriamento do ar;
- Alta pressão na região do Equador - Efeito de Coriolis.

Além disso, o movimento de massas de ar determina a formação dos ventos. Há locais no globo terrestre onde os ventos jamais param de circular, devido ao mecanismo de aquecimento e resfriamento presentes na natureza, são ventos denominados planetários ou constantes.

O comportamento do vento pode apresentar alterações devido à variação de sua velocidade ao longo do tempo e às características topográficas da região, como montanhas, vales e áreas planas. Essas variações podem causar redução ou aceleração na velocidade do vento, influenciando diretamente o seu potencial energético. Além disso, a velocidade do vento também varia em função da altura, um fenômeno conhecido como gradiente de velocidade do vento. Essa relação ocorre devido à diminuição do atrito com a superfície terrestre em maiores altitudes, sendo um fator determinante para o dimensionamento de aerogeradores.

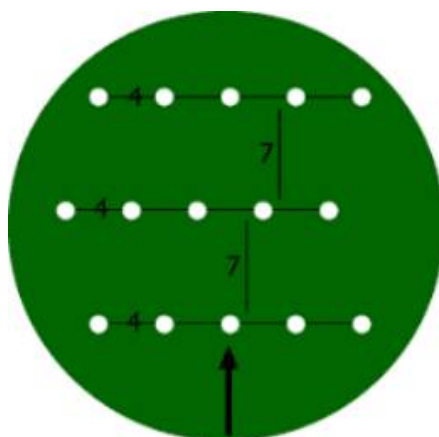
Os obstáculos, como edifícios, árvores e formações rochosas, influenciam fortemente na redução da velocidade do vento e geram turbulência em suas imediações. Uma região turbulenta pode se estender até aproximadamente três vezes a altura do obstáculo, sendo mais intensa na parte posterior do que na anterior. Isso ocorre porque o vento se desvia e se agita ao contornar os obstáculos (Castro, 2009).

É importante destacar que, quando uma turbina eólica gera energia mecânica a partir da energia do vento que a atinge, o vento que sai da turbina possui uma capacidade energética muito menor do que o vento que entrou, resultando em uma esteira de vento turbulento e com velocidade reduzida na parte traseira da turbina (Castro, 2009).

Essa consideração destaca a importância de um planejamento criterioso na disposição das turbinas eólicas (Figura 1). Conforme Castro (2009), normalmente, as turbinas são espaçadas a uma distância que varia entre cinco e nove diâmetros na direção preferencial do vento e entre três e cinco diâmetros na direção perpendicular. Mesmo que essas medidas sejam utilizadas, a experiência demonstra que a energia perdida devido ao efeito de esteira é de aproximadamente 5%. O fato é que para instalações de aerogeradores requer uma área superficial maior para reduzir o efeito da esteira.

Na Figura 1, os pontos na cor branca representam os aerogeradores instalados, os números representam os fatores em que o diâmetro do rotor deve ser multiplicado para estabelecer a distância entre os aerogeradores e a seta preta indica o sentido do vento.

Figura 1 - Distâncias das turbinas eólicas



Fonte: Castro (2009)

2.1 ENERGÍA EÓLICA

A energia eólica, ou energia do vento, tem sido utilizada pelo homem há séculos no transporte e no acionamento de mecanismos. Esse aparato é utilizado para a moagem de cereais e para a elevação de água na agricultura, como ocorre em moinhos e cataventos. Além disso, também é empregado na geração de energia elétrica (Cavadas, 2018). Atualmente, a energia do vento é aproveitada para gerar eletricidade por meio de turbinas eólicas acopladas a geradores elétricos. Nesse processo, a energia cinética das massas de ar em movimento é captada pelas pás das turbinas e convertida em energia cinética rotacional, sendo transformada em energia elétrica (Kalogirou, 2016).

Segundo Lopes (2012, p. 37), “a energia cinética de uma massa de ar m em movimento a uma velocidade v é dada por”:

$$E = \frac{1}{2} m v^2 \quad (01)$$

Onde:

E = energia cinética (J);

m = massa de ar (kg);

v = velocidade do vento (m/s).

Lopes (2012, p. 38) afirma “que a potência (P) disponível no vento é definida como a derivada com relação à massa da energia no tempo” e é expressa da seguinte forma:

$$P = \frac{\mu \cdot v^2}{2} \quad (02)$$

Onde:

P = potência disponível no vento (w);

μ = Fluxo da massa de ar (kg/s);

v = Velocidade do vento (m/s).

Uma vez que $\mu = \rho \cdot v \cdot A$, substituindo na equação, temos que:

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (03)$$

Onde:

P = potência disponível no vento (w);

ρ = massa específica do ar (kg/m³);

v = velocidade do vento (m/s);

A = área da seção transversal (m²).

Conforme Fadigas (2011), a área varrida pelas pás de uma turbina eólica do tipo hélice de eixo horizontal, como ilustrado na Figura 2, é calculada por meio da seguinte:

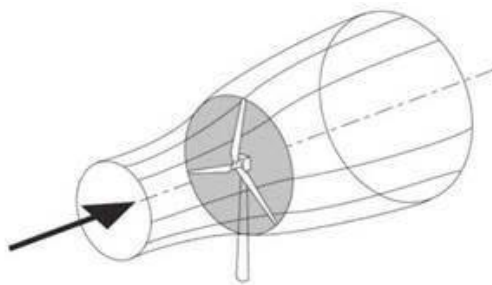
$$A = \frac{\pi D^2}{4} \quad (04)$$

Onde:

D = Diâmetro do rotor (metros);

A = Área varrida pelas pás de turbinas (m²).

Figura 2 - Área varrida pelas pás de turbina eólica



Fonte: Fadigas (2011).

O rendimento aerodinâmico (coeficiente de potência C_p) diz respeito à fração da potência eólica disponível convertida em potência mecânica no eixo do rotor, assim sendo, a eficiência do sistema mecânico pode ser substituída pelo rendimento global (η) do sistema, obtendo assim uma nova equação. Segundo López (2012) “o rendimento global do sistema é aproximadamente de 30%”. Assim sendo, a potência obtida do aerogerador:

$$P_a = \frac{1}{2} \rho A v^3 \eta \quad (05)$$

Onde:

P_a = potência obtida do aerogerador (W);

ρ = massa específica do ar (kg/m^3);

v = velocidade do vento (m/s);

A = área da seção transversal (m^2);

η = eficiência global do sistema.

De acordo com Lopez (2012, p. 39), “como a altitude do local afeta também a temperatura ambiente e a pressão atmosférica, a massa específica do ar é dependente de ambas. A expressão de estimativa da massa específica do ar, ou densidade, em função da altitude do local e da temperatura ambiente:”

$$\rho = \frac{353,4 \left(1 - \frac{H}{45271} \right)^{5,2624}}{273,15 + T} \quad (06)$$

Onde:

ρ = massa específica do ar (kg/m^3);

H = altitude do local (m);

T = temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$).

2.2. RECURSO SOLAR

A energia do Sol é transmitida para o planeta por meio da radiação eletromagnética, que resulta na radiação solar. Essa forma de energia é considerada uma fonte renovável, disponível para ser aproveitada na geração de eletricidade ou no aquecimento de água em residências, suprimindo parte das necessidades energéticas (Viana, 2010).

O Sol fornece energia para a atmosfera, essa energia pode se manifestar através da radiação solar total, composta pelas componentes direta, difusa e refletida. A energia recebida pelo planeta devido à radiação solar é de aproximadamente $1,39 \text{ kW/m}^2$. Grande parte dessa energia incide diretamente sobre a superfície terrestre, enquanto outra parte é dispersa pela atmosfera. Dessa forma, a energia que atinge a superfície da Terra é parcialmente absorvida, e a porção que não é absorvida é refletida de volta para a atmosfera (Hodge, 2011).

A radiação solar é descrita como a forma de transferência de energia proveniente do Sol, através da propagação de ondas eletromagnéticas ou fótons. A emissão de radiação que atinge a Terra, antes de atravessar a camada atmosférica, é conhecida como irradiação extraterrestre. O fluxo total dessa irradiação extraterrestre é denominado constante solar (G_0). O valor da constante solar é de aproximadamente 1367 W/m^2 , conforme adotado pelo World Radiation Center (WRC) (Guimarães, 2003).

Durante o percurso da radiação solar, ocorre um processo físico de espalhamento e absorção. Parte da energia é alterada devido ao espalhamento e outra parte é absorvida. A absorção da irradiação solar pela atmosfera ocorre principalmente devido a dois de seus componentes principais: ozônio e o vapor d'água, além de outros menos proeminentes, como o dióxido de carbono, o oxigênio e diversos outros gases. Cada um deles absorve uma porção da radiação incidente em quantidades variadas. Enquanto isso, o espalhamento na atmosfera é ocasionado, sobretudo, por moléculas gasosas, partículas e gotículas de água (Guimarães, 2003).

A radiação solar que atinge a superfície da Terra e incide sobre uma superfície receptora para a produção de energia é constituída por duas componentes: a radiação direta e a radiação difusa. A radiação direta depende da posição do Sol e é capaz de produzir sombras nítidas em qualquer objeto, enquanto a radiação difusa é aquela que chega à superfície da Terra após sofrer alterações em sua trajetória devido a processos de reflexão ou espalhamento. Assim, a radiação total incidente sobre uma superfície inclinada inclui uma componente adicional proveniente da radiação refletida pelo ambiente ao redor (como solo, vegetação, etc.) da superfície, a qual é denominada albedo (Pinho; Galdino, 2014).

A produção de energia em células fotovoltaicas começa com a transformação de semicondutores, como o silício, em células capazes de converter luz solar em eletricidade. Esse processo envolve várias etapas, como a purificação do silício, seguida pela dopagem, onde elementos químicos, como boro e fósforo, são adicionados para modificar as propriedades elétricas do material. A dopagem cria duas camadas: uma camada tipo P, com excesso de cargas positivas, e uma camada tipo N, com excesso de cargas negativas, ambas derivadas do silício puro (Alves, 2019).

Quando a luz solar, composta por fótons, incide sobre as células fotovoltaicas, ocorre o efeito fotoelétrico na junção N-P. Os fótons absorvem energia e excitam os elétrons, fazendo com que eles se movam da banda de valência para a banda de condução, gerando um fluxo de corrente elétrica. Esse processo é a base para a conversão direta da luz solar em energia elétrica, que é então aproveitada para alimentar sistemas e dispositivos elétricos (Alves, 2019).

2.2.1. POTÊNCIA SOLAR

Conforme Ribeiro (2016), o cálculo do consumo médio de energia e a forma de distribuição segue um processo sistemático baseado em equações que

consideram tanto a energia média consumida quanto o tipo de distribuição da rede elétrica. Nas residências, podem ser apresentados diferentes perfis de distribuição para fornecer energia suficiente, como monofásico, bifásico e trifásico. O primeiro passo é determinar a energia gerada (E_g), que é dada pela Equação 07:

$$E_g = ECM - TL \quad (07)$$

Onde:

E_g = Energia Gerada;

ECM = Energia Consumo Médio Mensal;

TL = Tipo de Distribuição.

$$DED = \frac{E_g}{30} \quad (08)$$

Onde:

DED = Demanda de Energia Diária

E_g = Energia Gerada.

Em sistemas de geração elétrica fotovoltaica ocorrem algumas perdas, pois depende de onde o sistema é instalado, como por exemplo: a formação de poeira principalmente em áreas rurais e proximidades de chaminés que podem eliminar fuligens assim como em locais com grande intensidade de trânsito de veículos automotivos. Essas são algumas das causas que contribuem para o acúmulo de sujeiras na superfície do módulo fotovoltaico, além de outras perdas conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Possíveis perdas no sistema fotovoltaico

Perdas	Varição
Perdas por temperatura	7% a 18%
Incompatibilidade elétrica	1% a 2%
Acúmulo de sujeira	1% a 8%
Cabeamento da corrente contínua	0,5% a 1%
Cabeamento da corrente alternada	0,5% a 1%
Inversor	2,5% a 5%

Fonte: Fotaic (2025).

<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/sntep/sef/materiais-disponiveis-para-download/RedEEDimensionamentobsicodesistemasfotovoltaicosModelo.xlsx>

Obtida a irradiação média anual, a demanda de energia diária e o rendimento do sistema, é possível obter a potência total dos painéis que devem ser instalados, Equação 09.

$$Potência\ total_{painéis} = \frac{Demanda\ de\ Energia\ Diária}{Irradiação\ solar \times Rendimento\ do\ sistema} \quad (09)$$

Uma vez calculado a potência fotovoltaica que deve ser instalada, o próximo procedimento é calcular a quantidade de painéis (QP) necessários, Equação 10.

$$QP = \frac{Potência\ total_{painéis}}{Potencia\ do\ painel} \times 1000 \quad (10)$$

3 METODOLOGIA

O estudo realizado tem um caráter exploratório uma vez que realizou um levantamento detalhado do potencial de geração de energia elétrica por meio de módulos fotovoltaicos e aerogeradores de pequeno porte em residências urbanas localizadas no município de Natal/RN (5°,47'40"S e 35°,12'40"W), nos bairros Lagoa Nova (5°50'05.9"S 35°12'27.1"W), Redinha (5°45'06.3"S 35°13'54.6"W) e Bom Pastor (5°48'56.7"N 35°14'19.6"W), os quais em média utilizaram energia elétrica respectivamente 345 kWh/mês, 253 kWh/mês e 177 kWh/mês.

O aerogerador considerado para o estudo é do tipo eixo horizontal modelo SM-3000, da marca SMARAAD, com potência nominal de 5000W. Para o dimensionamento da energia eólica necessária para as residências foram considerados as seguintes situações: a velocidade média do vento de 7 m/s, obtido por meio do Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (CRESESB), altura de instalação do aerogerador a 15m, temperatura média de 28 °C, raio do rotor 0,95m, rendimento global do sistema 28% e tempo de funcionamento do aerogerador 12 horas.

No dimensionamento da energia fotovoltaica foi tomado como objeto de análise o módulo fotovoltaico de 555W de potência nominal, que ocupa individualmente uma área de superfície de 2,583 m² (2,278 x 1,134 m), a irradiação média anual de 5,67 kWh/m²/dia, obtida por meio do CRESESB. Após o cálculo que define a quantidade de módulos por residência foi multiplicado pela área de um único módulo obtendo assim a área total necessária para instalação do sistema solar em cada residência do estudo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste estudo, consideramos apenas o consumo médio de cada residência. Para facilitar a apresentação, foi adotado letras para representar as residências ao longo do trabalho. A residência de Lagoa Nova, com uma média de consumo de aproximadamente 345 kWh/mês está representada pela letra “A”, a residência da Redinha, com uma média de consumo de 253 kWh/mês, corresponde a “B”, e a residência de Bom Pastor, cuja média de consumo é de 177 kWh/mês, a letra “C”. Esses dados de consumo médio serão fundamentais para o dimensionamento dos sistemas de geração de energia solar e eólica.

4.1 DIMENSIONAMENTO DE UM AEROGERADOR RESIDENCIAL (SISTEMA ON-GRID)

Nesta pesquisa, é dimensionado um aerogerador residencial para um sistema on-grid, com base na média do consumo de energia elétrica das residências. No caso de sistemas on-grid, a concessionária de energia COSERN cobra uma taxa pelo uso da rede elétrica, para ligações do tipo monofásico a taxa é equivalente a 30 KWh/mês. Dessa forma, para encontrar a energia que o aerogerador precisa produzir para suprir o consumo da energia mensal, foi utilizada a Equação 07, com consumo médio mensal das residências referenciadas por A, B e C, a energia gerada será em cada residência:

Cálculo da energia gerada:

Residência “A” $E_g = 345 - 30 = 315 \text{ kWh/mês}$

Residência “B” $E_g = 253 - 30 = 223 \text{ kWh/mês}$

Residência “C” $E_g = 177 - 30 = 147 \text{ kWh/mês}$

Para o cálculo da demanda de energia diária (DED), a fim de atender a necessidade diária, a energia gerada será dividida por 30, Equação 08.

Cálculo da demanda de energia diária:

Residência “A” $DED = 315 / 30 = 10,50 \text{ kWh/dia}$

Residência “B” $DED = 223 / 30 = 7,43 \text{ kWh/dia}$

Residência “C” $DED = 177 / 30 = 4,90 \text{ kWh/dia}$

Para o aerogerador, foram considerados os seguintes dados:

a) Raio do rotor: 0,95 m

- b) Velocidade média do vento: 7 m/s
- c) Altura de instalação: 15 m
- d) Rendimento global do sistema: 28%
- e) Temperatura: 28 °C
- f) Tempo de funcionamento: 12 horas

Com esses dados, é possível obter a potência do aerogerador, sendo necessário encontrar a área varrida pelo giro das pás do aerogerador, Equação 04, posteriormente encontrar a massa específica do ar obtido, Equação 06, e depois calcular a potência do aerogerador, Equação 05.

$$\text{Área de varredura das pás: } A = \frac{3,1416 \times 1,9^2}{4} = 2,84m^2$$

Calculando a massa específica do ar a 15 metros de altura da superfície (chão), considerando a temperatura de 28 °C, teremos:

$$\rho = \frac{353,4 \left(1 - \frac{15}{45271}\right)^{5,2624}}{273,15 + 28} = 1,1711kg/m^3$$

Obtendo a Potência de aerogerador teremos:

$$P_a = \frac{1}{2} \times 1,1711 \times 2,84 \times 7^3 \times 0,28 = 159,710W$$

Convertendo essa potência para quilowatts (kW), temos o seguinte resultado:

$$P_a = \frac{159,710}{1000} = 0,15971$$

Assumindo que o aerogerador funcionará por 12 horas por dia, a energia gerada é dada pela multiplicação da potência diária pelo tempo de operação:

$$EgD=0,15971 \times 12h=1,92kWh/dia$$

Portanto, a energia gerada diariamente (*EgD*) é de aproximadamente 1,92 kWh/dia.

Após calcular a energia gerada por um aerogerador, compararmos esse valor com a demanda diária de cada residência. Quantidade de aerogeradores para suprir a demanda diária de energia elétrica:

Residência “A” necessita de 10,50 kWh/dia. Teremos $1,92 \times 6 = 11,52$ kWh/dia.

Residência “B” necessita de 7,43 kWh/dia. Teremos $1,92 \times 4 = 7,68$ kWh/dia.

Residência “C” necessita de 4,90 kWh/dia. Teremos $1,92 \times 3 = 5,76$ kWh/dia.

Além do número de aerogeradores, é importante considerar o espaço físico para a instalação dos mesmos. De acordo com Castro (2009), deve-se manter uma distância de profundidade de 5 vezes o diâmetro do rotor e entre os aerogeradores

de 3 vezes o diâmetro lateralmente. Assim sendo, para a residência “A” são necessários aproximadamente uma área de, no mínimo 108,3m², para a residência “B” corresponde a aproximadamente 54,15 m² e a residência “C” 27,08 m².

4.2. DIMENSIONAMENTO SOLAR PARA RESIDÊNCIAS (SISTEMA ON-GRID)

Neste trabalho, é dimensionado painéis fotovoltaicos para uma residência, sistema on-grid, com base no consumo médio de energia elétrica das residências e considerado o tipo de ligação da residência monofásica. Como se trata de um sistema on-grid, a concessionária COSERN cobra uma taxa equivalente de 30 kWh/mês pelo uso da rede elétrica. Portanto, a energia líquida que precisa ser gerada pelo sistema é o consumo de energia de cada residência menos essa taxa de 30 kWh/mês, o que corresponde a demanda de energia diária já calculada anteriormente na seção 4.1.

Para calcular a potência necessária dos painéis, é preciso saber a irradiação solar e as perdas total do sistema, sabendo que a irradiação solar média (Horas de Sol Pico - HSP) para a região de estudo é de 5,67 kWh/m²/dia. Consideramos também as perdas inevitáveis no sistema, que acontece por causa da temperatura devido ao aquecimento dos painéis; da incompatibilidade elétrica entre módulos conectados, do acúmulo de sujeira (poeira e folhas) sobre o painel fotovoltaico que bloqueia a radiação solar, as perdas no cabeamento de corrente contínua e alternada, além das perdas no inversor durante a conversão de corrente, que são calculadas a partir dos seguintes fatores descrito na Tabela 2:

Tabela 2 - Possíveis perdas no sistema fotovoltaico residencial

Perdas	Variação	Atribuindo % de perda	Cálculo da diferença
Perdas por temperatura	7% a 18%	4%	$(100\% - 4\%)/100 = 0,96$
Incompatibilidade elétrica	1% a 2%	2%	$(100\% - 2\%)/100 = 0,98$
Acúmulo de sujeira	1% a 8%	3%	$(100\% - 3\%)/100 = 0,97$
Cabeamento da corrente contínua	0,5% a 1%	1%	$(100\% - 1\%)/100 = 0,99$
Cabeamento da corrente alternada	0,5% a 1%	1%	$(100\% - 1\%)/100 = 0,99$
Inversor	2,5% a 5%	3%	$(100\% - 3\%)/100 = 0,97$

Fonte: Autores (2024).

Para determinar o rendimento total do sistema, multiplicamos todos os fatores que contribuem para as perdas. Assim, obtemos:

$$\text{Rendimento do sistema} = 0,96 * 0,98 * 0,97 * 0,99 * 0,99 * 0,97 \approx 0,8675$$

Para determinar a potência total dos painéis fotovoltaicos necessária para atender a demanda de energia de cada residência, utilizamos o método descrito por Kalogirou (2016), que fornece uma forma precisa de calcular a potência gerada por painéis fotovoltaicos para uma demanda específica de energia residencial, utilizando a Equação 09 obteremos:

Cálculo da potência a ser instalada de painéis fotovoltaica para atender a demanda diária das residências:

$$\text{Residência "A"} \text{ Potência total}_{\text{painéis}} = \frac{10,50}{5,67 \times 0,8675} = 2,13 \text{ kW}.$$

$$\text{Residência "B"} \text{ Potência total}_{\text{painéis}} = \frac{7,43}{5,67 \times 0,8675} = 1,51 \text{ kW}.$$

$$\text{Residência "C"} \text{ Potência total}_{\text{painéis}} = \frac{4,90}{5,67 \times 0,8675} = 1 \text{ kW}.$$

Para suprir a demanda de consumo de energia de cada residência, é necessário calcular a quantidade de painéis (QP) fotovoltaicos necessários para atender à demanda energética específica. Para isso, a potência total que precisa ser gerada para cada residência é dividida pela potência de cada painel, Equação 10:

Quantidade de painéis para suprir a demanda diária de energia elétrica:

$$\text{Residência "A"} \text{ necessita de: } \frac{2,13}{555} * 1000 = 3,837 \cong 4$$

$$\text{Residência "B"} \text{ necessita de: } \frac{1,51}{555} * 1000 = 2,720 \cong 3$$

$$\text{Residência "C"} \text{ necessita de: } \frac{1}{555} * 1000 = 1,801 \cong 2 .$$

Para a residência "A", será necessária a instalação de 4 painéis fotovoltaicos, ocupando um espaço total de aproximadamente 10,32 m². Na residência "B", é necessária a instalação de 3 painéis fotovoltaicos, sendo necessário um espaço total de aproximadamente 7,74 m². Essa área é essencial para garantir a instalação adequada dos painéis, permitindo uma disposição que maximize a eficiência na captação de energia solar e em "C", que exige a instalação de 2 painéis fotovoltaicos, será necessário um espaço total de aproximadamente 5,16 m².

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como propósito analisar e dimensionar sistemas de energia solar e eólica para três residências com diferentes perfis de consumo de energia elétrica, tendo como intuito identificar a quantidade necessária de painéis fotovoltaicos e aerogeradores para atender à demanda de consumo de energia elétrica de cada residência e apresentar um sistema mais eficiente.

Foi realizado estudo que envolveu a coleta de dados sobre a irradiação solar, a velocidade do vento, as configurações dos sistemas de energia solar e eólica e dos inversores, além dos dados de consumo de energia elétrica de cada residência. Esses dados permitiram avaliar a capacidade de geração dos sistemas e realizar comparações para definir que sistema seria mais adequado para cada residência.

Com base nos dados de consumo energético das residências analisadas, para a residência localizada em Lagoa Nova, com um consumo médio diário de 10,500 kWh/dia, seriam necessários 6 aerogeradores competência nominal de 5000W para atender à demanda diária de energia elétrica, ocupando uma área de instalação de 108,3 m². Em contrapartida, apenas 4 painéis fotovoltaicos de 555W, que exigiriam uma área de 10,53 m², seriam suficientes para gerar a mesma demanda diária. Na residência do bairro da Redinha, com consumo médio diário de 7,367 kWh/dia, seriam necessários 4 aerogeradores, cobrindo uma área de 54,14 m², e 3 painéis fotovoltaicos, ocupando uma área de 7,75m², para suprir a demanda energética mensal. Já na residência situada no Bom Pastor, cuja demanda de energia elétrica é de 4,90 kWh/dia, seriam necessários 3 aerogeradores que ocupariam uma área de 27,08 m², mas utilizando painel fotovoltaico são necessários 2, que ocupam uma área de 5,16 m².

Dessa forma, essas análises apontam que o sistema fotovoltaico é mais viável para implementação em residências, principalmente devido à baixa variação na irradiação solar, essa regularidade torna o sistema fotovoltaico mais eficiente, exigindo menos módulos e ocupando uma área menor para instalação, o que facilita sua aplicação em espaços limitados. Por outro lado, os aerogeradores apresentam menor eficiência na geração de energia elétrica em residências e manter as áreas mínimas para instalação dos aerogeradores em cada situação citada é fundamental para evitar interferências no fluxo de ar e garantir a eficiência do sistema. Além disso, pode ter uma grande variação da velocidade do vento em locais urbanos a qual compromete ainda mais seu desempenho, já que requer grandes áreas livres para instalação, tornando os aerogeradores menos práticos e menos viáveis para o ambiente residencial em áreas urbanas. Dessa forma, o sistema fotovoltaico destaca-se como a solução mais eficiente, adaptável e sustentável para atender à demanda energética de residências em áreas urbanas.

Contudo, apesar das análises realizadas, algumas limitações devem ser consideradas, por exemplo, as condições climáticas das regiões estudadas demonstram que os resultados obtidos podem não ser aplicáveis a outras regiões que tenham diferenças na velocidade do vento e na irradiação solar. Além disso, o foco da pesquisa foi voltado para a viabilidade técnica dos sistemas, sem levar em conta aspectos econômicos, como os custos de aquisição e manutenção dos equipamentos.

Estudos futuros podem explorar a viabilidade econômica desses sistemas, considerando o tempo de retorno do investimento para cada tipo de sistema de geração de energia elétrica. Além disso, outras pesquisas poderiam investigar sistemas híbridos que combinem geração solar e eólica. Dessa forma, esse tipo de investigação poderia apoiar a implementação mais ampla de soluções renováveis em residências.

REFERÊNCIAS

ANEEL. Cadernos Temáticos ANEEL: Micro e Minigeração Distribuída Sistema de Compensação de Energia Elétrica. 2. ed. Brasília: [s.n.], 2016. 34 p. Disponível em: <<https://www.cemig.com.br/wp-content/uploads/2020/08/Caderno-tematico-Micro-e-Minigeraçao-Distribuida-2-edicao.pdf>>. Acesso em: 11 JUN. 2024.

ANEEL. Resolução Normativa Aneel Nº 1.000/ 2021. Brasília, 2021. Disponível em: <<https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20211000.pdf>>. Acesso em: 15 out. 2024.

ANEEL. Resolução Normativa Nº 1059/2023. Disponível em: <<https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20231059.pdf>>. Acesso em: 04 jun. 2024.

ALVES, M.O.L. Energia solar: estudo da geração de energia elétrica através dos sistemas fotovoltaicos on-grid e off-grid. 2019. Disponível em: <https://www.monografias.ufop.br/bitstream/35400000/2019/6/MONOGRAFIA_EnergiaSolarEstudo.pdf>. Acesso em: 15 jun. 2024.

AMÊNDOLA, C. A. M.. Contribuição ao estudo de aerogeradores de velocidade e passo variáveis com gerador duplamente alimentado e sistema de controle difuso. 2007. 216 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18133/tde-06122007-142431/publico/TESE_AmendolaCAM.pdf>. Acesso em: 05 jun. 2024.

CASTRO, R. M. G. Energias renováveis e produção descentralizada: introdução à energia eólica. 4. ed. Lisboa: Universidade Técnica de Lisboa, 2009.

CAVADAS, L. de. S. INTEGRAÇÃO DE DADOS DE SISTEMAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA RENOVÁVEIS: IMPLEMENTAÇÃO NO POLO DE INOVAÇÃO CAMPOS DOS GOYTACAZES –Mestrado - IFRJ - 2018. Disponível em: <<https://portal2015.iff.edu.br/pesquisa-e-inovacao/pos-graduacao-stricto-sensu/m-estrado-profissional-em-sistemas-aplicados-a-engenharia-e-a-gestao/dissertacoes-defendidas/ingressantes-2016.1/integracao-de-dados-de-sistemas-de-geracao-de-energia-renovaveis-implementacao-no-polo-de-inovacao-campos-dos-goytacazes>>. Acesso em: 06 ago. 2024.

CRESESB. Energia eólica: Princípios e Aplicações. 2008. Disponível em: <http://paje.fe.usp.br/~mef-pietro/mef2/app.upload/7/_mefmi_003-05.pdf>. Acesso em: 22 abr. 2024.

FADIGAS, E. A. F. A. Energia eólica. 1. ed. São Paulo: Manole, 2011.

FOTAIC. Dimensionamento de sistema solar fotovoltaico. Disponível em: <<https://fotaic.com.br/post/dimensionamento-sistema-solar-fotovoltaico>>. Acesso em: 22 abr. 2024.

GUIMARÃES, A. P. C. Estimativa de parâmetros da camada atmosférica para cálculo da irradiação solar incidente na superfície. 2003. 185 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Coppe, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

HODGE, B.K. Sistema e aplicações de energia alternativa. LCT, 2011.

KALOGIROU, S. Engenharia de energia solar - Processos e sistemas. São Paulo: GEN LTC, 2016.

LIMA, L. J. B.; HAMZAGIC, M. Estratégias para a transição energética: revisão de literatura. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento, São Paulo, p. 96-120, 2022. Disponível em: <<https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-ambiental/transicao-energetica>>. Acesso em: 05 jun. 2024.

LOPES, Ricardo Aldabó. Energia Eólica. 2.ed. São Paulo: Artliber Editora, 2012.

MESQUITA, J.C. Estudo sobre a transição energética na matriz elétrica brasileira. 2022. 65 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Energias Renováveis) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022.

PINHO, J. T. GALDINO, M.A. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. Rio de Janeiro: 2014. 530 p. Disponível em: <https://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf>. Acesso em: 22 abr. 2024.

RIBEIRO, R.P. Estudo de Caso: Dimensionamento de um sistema fotovoltaico residencial. Minas Gerais: Araxá, Centro federal de educação tecnológica de Minas Gerais, 2016. Disponível em: <<https://www.eng-automacao.araxa.cefetmg.br/wp-content/uploads/sites/152/2018/01/Tcc-Raylla-1.pdf>>. Acesso em: 22 out. 2024.

VIANA, T. D. S. Potencial de Geração de Energia Elétrica com Sistemas Fotovoltaicos com Concentrador no Brasil. 2010. 165 f. tese (doutorado) - Curso de engenharia civil, Centro tecnológico ,universidade federal de santa catarina, florianópolis,2010. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/93778>>. Acesso em: 28 ago. 2024.

VILLALVA, M. G. Energia solar fotovoltaica: Conceitos e aplicações. 2 ed. São Paulo: Érica, 2015.



CAPÍTULO 7

DOI: 10.63951/synapse978-65-88890-61-5_7

LUIZ FELIPE DE SOUZA SILVA¹
LEONARDO LINHARES OLIVEIRA¹
ANA LÚCIA DANTAS¹
MARCOS SANTOS NUNES²
ARTUR DA SILVA CARRIÇO²

ACOPLAMENTO DIPOLAR, PRODUTO ENERGÉTICO MÁXIMO E CAMPO DIPOLAR DE NANOPARTÍCULAS DO TIPO NÚCLEO@CASCA

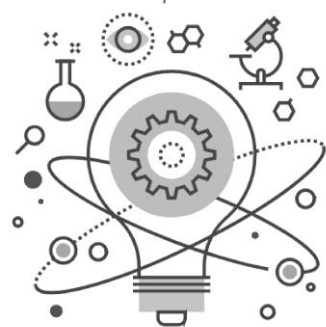
Resumo

O avanço científico em nanomagnetismo impulsionou estudos em nanopartículas do tipo núcleo@casca (core-shell) como alternativa para ímãs mais eficientes e sustentáveis, visando reduzir a dependência de elementos de terras-raras. Esta pesquisa investiga como a interação entre os materiais magnéticos duros e macios em nanopartículas podem otimizar o produto de energia máximo, $(BH)_{\text{máx}}$, um parâmetro chave para ímãs permanentes. Através da utilização de simulações computacionais, o estudo analisou configurações duro@macio e macio@duro com geometria esférica, combinando os materiais CoPt, NdFeB, Fe e CoFe₂. O objetivo foi relacionar o comportamento do produto energético com variáveis das diferentes configurações do sistema de estudo, como tamanho do núcleo, espessura de casca e materiais envolvidos. Para isso, perfis magnéticos, campo dipolar e características dos materiais foram analisadas a fim de compreender os sistemas de estudo propostos. Os resultados indicam que nanopartículas núcleo@casca exibem diversas características magnéticas e podem alcançar um aumento significativo no produto energético sob certas condições geométricas. Essas descobertas reforçam o potencial dessas nanopartículas para a produção de ímãs permanentes de alto desempenho.

Palavras-chave: Nanomagnetismo; Teoria Micromagnética; Nanopartículas núcleo@casca; Ímãs permanentes.

¹ Universidade do Estado do Rio Grande do Norte

² Universidade Federal do Rio Grande do Norte



Abstract

Scientific advances in nanomagnetism have driven research on core@shell nanoparticles as an alternative for more efficient and sustainable permanent magnets, aiming to reduce the dependence on rare-earth elements. This research investigates how the interaction between hard and soft magnetic materials in nanoparticles can optimize the maximum energy product, $(BH)_{\max}$, a key parameter for permanent magnets. Through the use of computational simulations, the study analyzed hard@soft and soft@hard configurations with a spherical geometry, combining the materials CoPt, NdFeB, Fe, and CoFe₂. The objective was to relate the behavior of the maximum energy product with variables of the different system configurations, such as core size, shell thickness, and the materials involved. To this end, magnetic profiles, the dipolar field, and material characteristics were analyzed in order to understand the proposed study systems. The results indicate that core@shell nanoparticles exhibit diverse magnetic features and can achieve a significant increase in the maximum energy product under specific geometric conditions. These findings reinforce the potential of these nanoparticles for the production of high-performance permanent magnets.

Keywords: Nanomagnetism; Micromagnetic Theory; Nanoparticles core@shell; Permanent magnets.

INTRODUÇÃO

O desenvolvimento dos materiais magnéticos tem proporcionado uma significativa miniaturização e aumento na performance dos dispositivos tecnológicos nos últimos anos (Souza, 2020). Propriedades magnéticas otimizadas garantem velocidade, segurança e armazenamentos eficientes para aplicações de diferentes áreas do conhecimento. Nessa linha, as nanopartículas magnéticas, em especial as do tipo núcleo@casca (core@shell) têm sido alvo de intensos estudos acadêmicos e industriais (Nunes *et al.*, 2023).

Nesse sistema multifásico é possível obter propriedades otimizadas pela combinação de materiais com características distintas em estrutura compacta. Tal versatilidade as torna promissoras para a produção de ímãs permanentes de alto desempenho, além de aplicações em outras áreas como: biomédica, ambiental e eletrônica (Granados-Miralles *et al.*, 2018; Zhu *et al.*, 2018; Materón *et al.*, 2021). Diversas investigações para ímãs permanentes usando nanopartículas ou nanocompósitos núcleo@casca foram reportadas (Oliveira *et al.*, 2018; Du *et al.*, 2019; Shen; Sun, 2019; Nunes *et al.*, 2023; Do *et al.* 2024). A relevância das nanopartículas núcleo@casca para a produção de ímãs permanentes é amplificada pelo cenário global: a transição energética, impulsionada pela Agenda 2030, demanda diretamente ímãs mais eficientes para motores elétricos, sistemas de economia de energia e geração de energias renováveis (Kovacs *et al.*, 2020).

A qualidade de ímã permanente de alto desempenho é avaliado a partir do produto energético máximo, $(BH)_{\text{máx}}$, uma métrica que indica a densidade de energia armazenada e a estabilidade magnética do material (Granados-Miralles *et al.*, 2018; Cullity, 2009). O produto energético máximo corresponde à área do maior retângulo que pode ser inscrito no segundo quadrante da curva de histerese $B(H)$ do material magnético (Coey, 2020). Contudo, os ímãs mais eficientes atualmente são compostos por materiais de terras-raras, como o NdFeB. Essa dependência cria um desafio econômico e estratégico significativo, uma vez que cerca de 80% do fornecimento mundial desses metais tem origem na China, gerando grande instabilidade econômica e crises de abastecimento como em 2011 (Coey, 2020). Além disso, há sérias preocupações ambientais associadas à mineração e processamento desses elementos, pois são altamente poluentes.

Dessa forma, a busca por alternativas viáveis é, portanto, urgente. Nesse contexto, as nanopartículas núcleo@casca, que combinam fases magnéticas duras e macias, surgem como uma solução estratégica para desenvolver ímãs de alta performance com pouco ou nenhum material de terras-raras. Trabalhos seminais, como o de Kneller e Hawig (1991), e estudos recentes (Yang *et al.*, 2022; Silva *et al.*, 2025) já demonstraram o potencial dessas estruturas para aprimorar o produto energético máximo $(BH)_{\text{máx}}$.

Dessa forma, este trabalho investiga como otimizar o $(BH)_{\text{máx}}$ nessas estruturas. Por meio de simulações computacionais, analisamos parâmetros geométricos (tamanho do núcleo e espessura da casca) e como a escolha de materiais em configurações duro@macio e macio@duro impactam o desempenho magnético e o perfil de reversão do sistema. O objetivo é fornecer um caminho para a construção de novos ímãs permanentes mais eficientes, econômicos e sustentáveis.

2. FUNDAMENTOS DO NANOMAGNETISMO PARA ÍMÃS PERMANENTES

Para compreender a otimização de ímãs permanentes em nanoescala, três conceitos são fundamentais: a classificação e caracterização de materiais magnéticos a partir de suas curvas de histerese, a teoria micromagnética que permite analisar, por meio de simulações, o comportamento desses sistemas magnéticos e a definição do produto energético máximo $(BH)_{\text{máx}}$ como parâmetro de desempenho.

2.1 CURVAS DE HISTERESES E CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS.

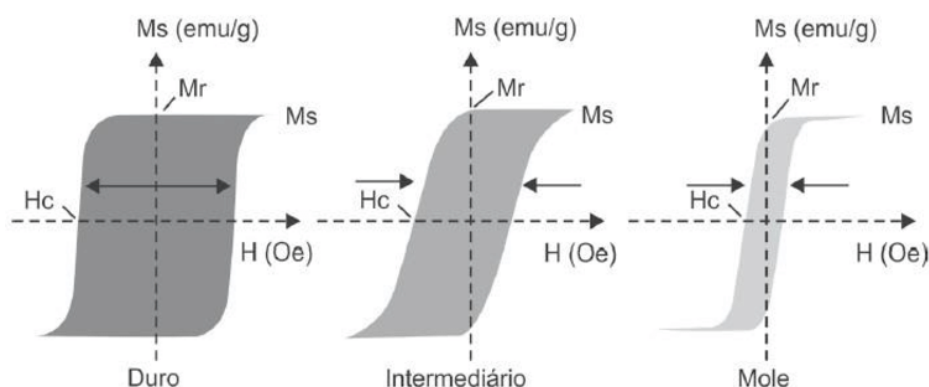
A resposta de um material a um campo magnético externo (H) é visualizada através da curva de histerese, que relaciona a magnetização (M) com o campo aplicado, sendo uma das principais formas de descrever um sistema magnético (Narasimhan, 2022). Essa curva revela propriedades cruciais e permite classificar os materiais em duros e macios. Alguns livros consideram materiais intermediários também como uma classificação. Tal classificação é dada conforme a largura da curva e também pode ser diferenciada quanto a sua altura.

Materiais magnéticos macios, também chamados de moles, têm baixa coercividade e atingem sua magnetização de saturação em campos com intensidades pequenas, isto é, são desmagnetizados e magnetizados facilmente (Callister, 2016). Dessa forma, esses materiais são empregados em dispositivos sujeitos a campos magnéticos alternados e onde as perdas de energia devem ser baixas, como em transformadores (Callister, 2016). Por esse motivo, a curva de histerese desses materiais são finas e estreitas como mostra a Figura 1.

Materiais considerados intermediários, por sua vez, possuem propriedades situadas em entre os materiais macios e duros. Estes são empregados em aplicações onde o equilíbrio entre alta coercividade e baixa coercividade é desejável, como em gravações magnéticas (Lima *et al.*, 2019).

Por fim, materiais magnéticos duros, são empregados em ímãs permanentes, pois, devem apresentar alta resistência à desmagnetização (Callister, 2016). Conforme a Figura 1, no ciclo de histerese, materiais considerados duros possuem alta remanência, alta coercividade e moderada magnetização de saturação, mostrada diretamente pela larga curva de histerese (Callister, 2016). Além disso, como subclasses de materiais duros, existem os materiais duros de alta energia, tais como: Samário-Cobalto e Neodímio-Ferro-Boro amplamente utilizados em ímãs de alta estabilidade e alta magnetização (Callister, 2016).

Figura 1: Curvas histereses para classificação dos materiais



Fonte: Lima et al., 2019.

A combinação estratégica desses dois tipos de materiais em uma única nanopartícula é a solução proposta deste trabalho: o material duro fornece a estabilidade magnética (coercividade), enquanto o material macio contribui para elevar a magnetização geral do sistema.

2.2 MODELO TEÓRICO: TEORIA MICROMAGNÉTICA

Descrever o comportamento magnético de uma nanopartícula, que contém milhões de átomos, é um desafio computacional custoso. A teoria micromagnética resolve esse problema ao dividir o material em pequenas porções, chamadas células de simulação. Em vez de calcular a interação de cada átomo, atribui-se um único momento magnético a cada célula, tornando a simulação viável.

O comportamento magnético de cada célula é determinado por uma competição entre diferentes energias: a energia de troca, que tende a alinhar momentos magnéticos vizinhos; a energia Zeeman, que os alinha com um campo magnético externo; a energia de anisotropia, que os direciona para um eixo cristalográfico preferencial; e a energia dipolar, que representa a interação de longo alcance entre todos os momentos do sistema (Morrish, 2001). O estado de equilíbrio da nanopartícula, e portanto suas propriedades magnéticas, é a configuração que minimiza a energia total do sistema, descrita pela soma dessas contribuições conforme Equação 1.

$$E_{total} = \frac{A}{\delta^2} \sum_{ij} (1 - \vec{m}_i \cdot \vec{m}_j) - \vec{H} \cdot M_S \sum_i \vec{m}_i - K \sum_i (\vec{m}_i^x) + \frac{M_S^2}{2} \sum_i \sum_k \left(\frac{(\vec{m}_i \cdot \vec{m}_k)}{n_{ik}^3} - \frac{3(\vec{m}_i \cdot \vec{n}_{ik})(\vec{m}_k \cdot \vec{r}_{ik})}{n_{ik}^5} \right) \quad (1)$$

Na qual os dois primeiros termos correspondem a energia de troca e a energia Zeeman respectivamente, e os dois últimos termos representam a contribuição do campo anisotrópico e a interação do campo dipolar, nessa ordem. A configuração mínima de energia é dada quando a interação de cada energia dessa na célula é mínima, calculada pelo campo efetivo local (H_{eff}), ou seja, esse campo é calculado para cada célula de simulação. A configuração de mínima energia do sistema é caracterizada quando momento magnético de cada célula deve estar na mesma direção do cálculo do campo efetivo calculado, isso é realizado através de procedimentos numéricos e autoconsistentes no algoritmo até um critério de parada pré estabelecido. O campo efetivo é dado pela Equação 2.

$$\vec{H}_{eff}^p = \frac{-1}{M_S} \frac{\partial E(i)}{\partial \vec{m}_i^p} \quad (2)$$

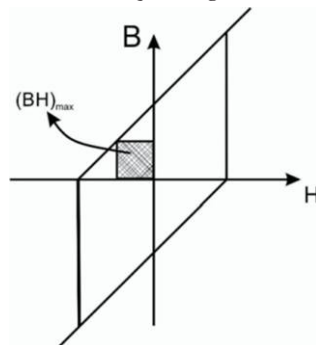
2.3 ÍMÃS PERMANENTES E O PRODUTO ENERGÉTICO MÁXIMO $(BH)_{MÁX}$

O principal parâmetro para avaliar a qualidade de um ímã permanente é o produto energético máximo $(BH)_{máx}$ (Granados-Mirallès *et al.*, 2018). Ele representa a máxima densidade de energia que o ímã pode armazenar e é calculado a partir da área do maior retângulo que pode ser inscrito no segundo quadrante da curva de histerese $B(H)$, como mostra a Figura 2 (Coey, 2020). Um $(BH)_{máx}$ elevado significa que é necessária uma menor quantidade de material para gerar o mesmo campo magnético, permitindo a criação de dispositivos menores e mais eficientes. Teoricamente, para um material ideal, o produto energético máximo é diretamente proporcional à magnetização de saturação (M_s) através da relação (Cullity, 2009):

$$(BH)_{max} = \frac{\mu_0 M_S^2}{4} \quad (3)$$

Essa equação é crucial, pois demonstra que o caminho para ímãs com maior desempenho depende diretamente do aumento da magnetização de saturação do material. Isso justifica a estratégia de combinar um material macio de alta magnetização de saturação com um material duro para criar um ímã composto superior.

Figura 2: Curva de indução magnética com destaque para o BH.



Fonte: Oliveira (2016).

3. METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho é baseada em simulações computacionais para analisar as variáveis que influenciam o produto energético máximo em sistemas de nanopartículas núcleo@casca. As análises dos sistemas foram realizadas por meio de procedimentos numéricos fundamentados na teoria micromagnética considerando tamanho da partícula, energias associadas ao sistema, tamanho das células de simulação, fases magnéticas, campo efetivo de cada célula, para somente então, discorrer sobre o produto energético máximo.

O sistema de estudo neste trabalho foi constituído de nanopartículas do tipo núcleo(d)@casca(δ) com geometria esférica. Os materiais ferromagnéticos utilizados incluem o Neodímio-Ferro-Boro ($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$) e Cobalto-Platina (CoPt), como ferromagnéticos duros, e a liga de Cobalto-Ferro (CoFe_2) e o Ferro (Fe), como os ferromagnéticos macios. As nanopartículas foram avaliadas com espessuras de casca (δ) variando de 1nm a 5nm e diâmetro do núcleo (D) de 9nm, 15nm e 21nm considerando as seguintes configurações: duro@macio e macio@duro, a fim de estabelecer correlações do produto energético com parâmetros geométricos e a combinação dos materiais. Além disso, na entrada do algoritmo consideramos parâmetros intrínsecos dos materiais, que ajudam a entender a relação de campo dipolar e comportamentos magnéticos do sistema de estudo. A Tabela 1 apresenta os parâmetros intrínsecos dos materiais utilizados neste trabalho.

Tabela 1: Parâmetros intrínsecos dos materiais CoFe_2 , CoPt, Fe e $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$.

Material	$M_s (10^6 \text{ A/m})$	$H_c (\text{T})$	$A (10^{-12} \text{ J/m})$
CoFe_2	1.8	0.020	1.9
CoPt	0.8	12.3	10
Fe	1.7	0.055	25
$\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$	1.3	7.80	7.7

Fonte: Jimenes-Villacorta *et al.* 2014; Mohan *et al.*, 2008; Viart *et al.*, 2004; Soares *et al.*, 2013; Dantas, 2010;

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

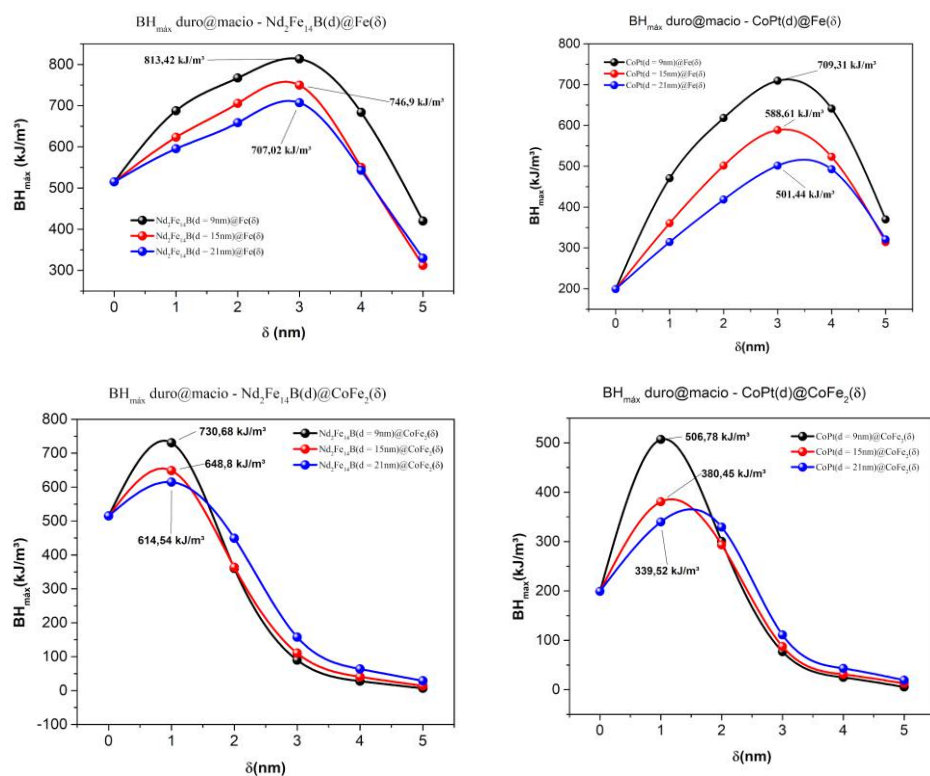
Os resultados obtidos indicam que as nanopartículas núcleo@casca apresentam uma diversidade de fases magnéticas, além de propriedades magnéticas aprimoradas, o que expande significativamente seu potencial em aplicações tecnológicas principalmente como peças promissoras para construção de ímãs permanentes. A primeira configuração analisada foi o sistema duro@macio. Nesse

sistema, tem-se um material com coercividade elevada ($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ e CoPt) e, na casca, materiais com alta magnetização (Fe e CoFe_2).

De modo geral, o principal resultado dessa configuração é a existência de uma espessura crítica, na qual o produto energético atinge seu valor máximo e decai rapidamente, tornando-se muitas vezes inferior ao material do núcleo puro. Além disso, diâmetros de núcleos menores fornecem produto energético superior.

Nas configurações combinadas com o Ferro na casca a espessura crítica foi $\delta = 3\text{nm}$, e alinhadas com diâmetro de 9 nm os resultados foram expressivos. O sistema $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}(d = 9\text{nm})@Fe(\delta = 3\text{nm})$ apresentou um produto energético de $813,42\text{ kJ/m}^3$ apresentando um aumento de 58% em relação ao núcleo em sua fase pura ($515,02\text{ kJ/m}^3$), enquanto o $\text{CoPt}(d = 9\text{nm})@Fe(\delta = 3\text{nm})$ mostrou um produto energético de $709,31\text{ kJ/m}^3$, 254% maior que o CoPt em sua forma pura (200 kJ/m^3) (Figura 3). O $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}(d = 9\text{nm})@CoFe_2(\delta = 1\text{nm})$, combinação que apresentou o maior produto energético, apresentou um $BH_{\text{máx}}$ de $730,68\text{ kJ/m}^3$. Um ganho percentual de aproximadamente 42% com relação ao núcleo puro, enquanto o $\text{CoPt}(d = 9\text{nm})@CoFe_2(\delta = 1\text{nm})$ mostrou um produto energético de $506,78\text{ kJ/m}^3$, o maior dentre a combinação desses materiais, um ganho percentual de 153% (Figura 3). Embora o ganho na combinação do Ferro e Cobalto-Ferro com o Cobalto-Platina seja extremamente chamativo, o ideal é considerar o valor para o custo-benefício desses materiais para produção em larga escala.

Figura 3: Produto energético do sistema $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}(d)@Fe(\delta)$ e $\text{CoPt}(d)@Fe(\delta)$

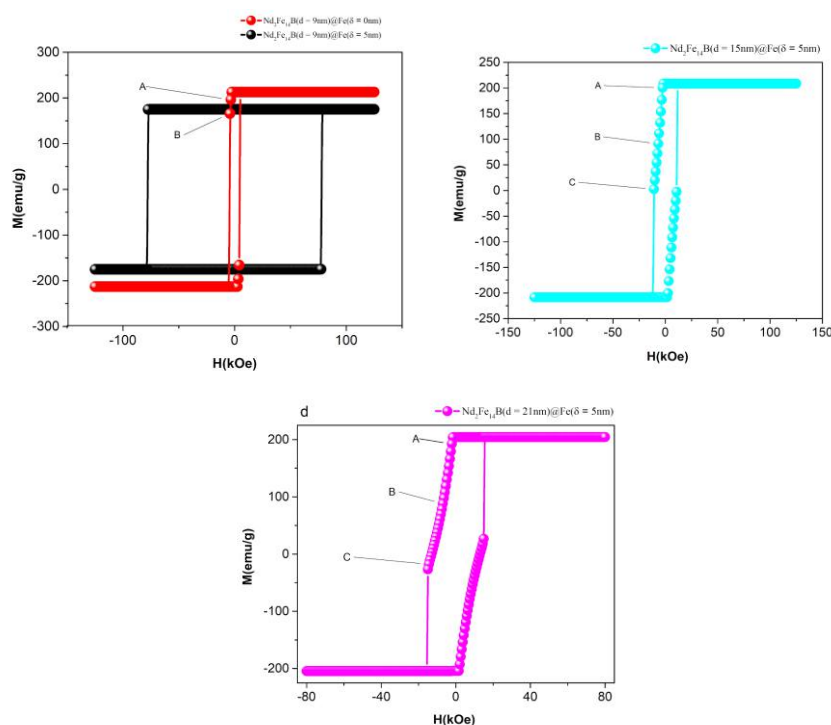


Fonte: Autores, 2024.

Esse comportamento é resultado de um balanço entre coercividade e magnetização total do sistema. A adição da casca macia eleva a magnetização do sistema, no qual, em teoria, deveria potencializar o $B(H)_{\text{máx}}$. Contudo, essa adição também reduz a coercividade geral da nanopartícula, dessa forma, até a espessura crítica o ganho de magnetização supera a perda de coercividade, resultando em um $B(H)_{\text{máx}}$ elevado.

Após a espessura crítica, o produto energético decai também porque a casca se torna espessa demais para ser magneticamente controlada pelo núcleo. Isso leva ao surgimento de não uniformidades magnéticas durante a reversão, ou seja, o núcleo e a casca não se comportam magneticamente da mesma forma. Esse efeito é intensificado em núcleos maiores ($d = 15\text{nm}$ e $d = 21\text{nm}$) pelo espaço maior de rearranjo magnético e pela ação do campo dipolar que acelera a reversão magnética na casca, diminuindo-se a magnetização total e consequentemente o desempenho magnético do sistema. É possível observar as não uniformidades presentes nas curvas de histerese na Figura 4 do sistema $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}(d = 9, 15, 21\text{nm})@ \text{Fe}(\delta = 5\text{nm})$, esse efeito é semelhante para os outros sistemas.

Figura 4: Curvas de histerese do sistema $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}(d = 9, 15 \text{ e } 21\text{nm})@ \text{Fe}(\delta = 5\text{nm})$

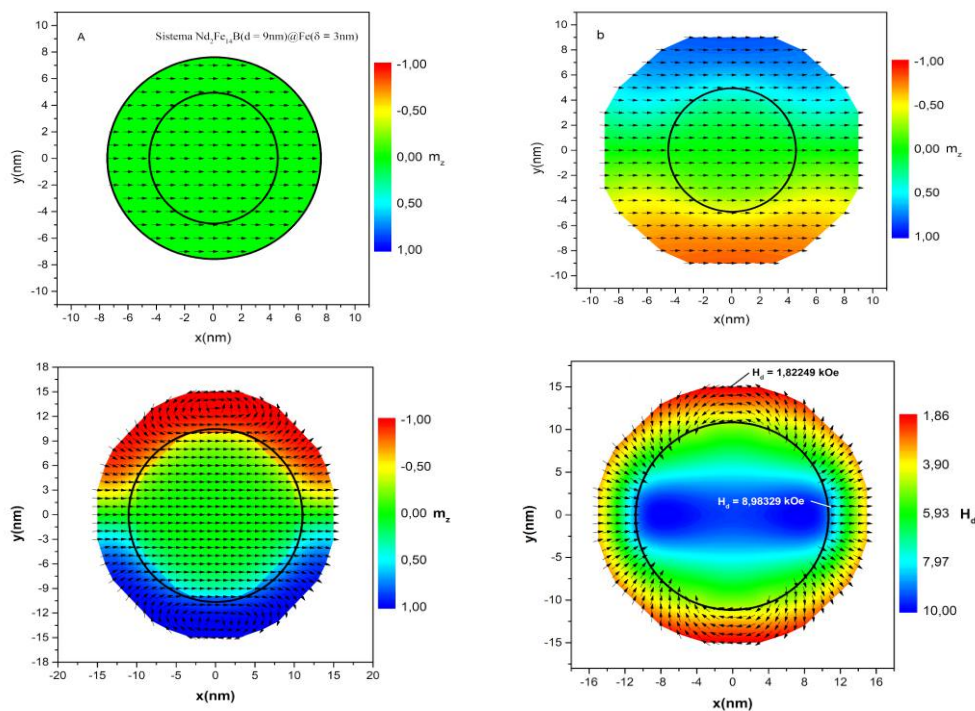


Fonte: Autores, 2024.

É facilmente possível visualizar a diferença entre a fase de reversão dos sistemas das curvas de histerese acima analisando os perfis magnéticos. A reversão da magnetização do sistema para núcleos menores com a espessura crítica ocorre de maneira abrupta e conjunta, enquanto que para núcleos maiores ou com casca acima da espessura crítica ocorre a reversão primeiro da casca e depois do núcleo. Alguns

sistemas maiores apresentam fase de vórtices magnéticos. Além disso, a casca sofre o efeito do campo dipolar exercido pelo núcleo reorientando sua magnetização e afetando o produto energético.

Figura 5: Perfil magnético do sistemas $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}(d = 9\text{nm})@Fe(\delta = 3\text{nm e } 5\text{nm})$ e perfil magnético juntamente com o campo dipolar do sistema $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}(d = 21\text{nm})@Fe(\delta = 5\text{nm})$



Fonte: Autores, 2024.

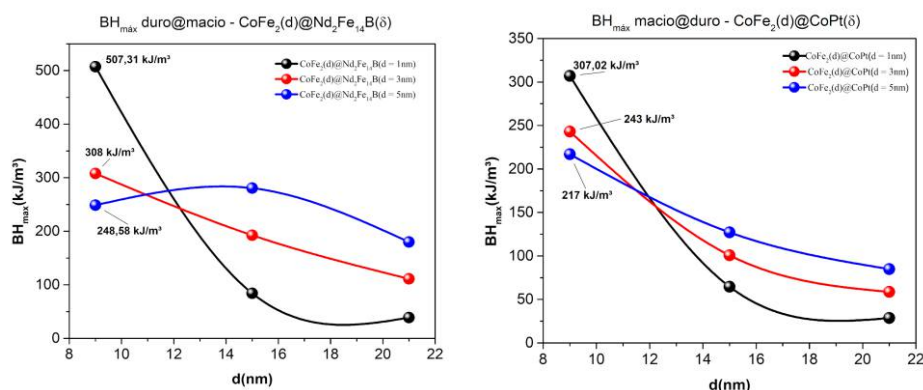
4.1 SISTEMAS MACIO@DURO

Nesta segunda análise, os resultados buscaram melhoria no produto energético e para comparar com os sistemas duro@macio. No tipo de sistema macio@duro, o núcleo consiste em um material de alta magnetização (Fe e CoFe_2) enquanto a casca possui elevada coercividade (CoPt e $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$). Na investigação dessa configuração, fixamos uma espessura de casca e aumentamos o diâmetro do núcleo, visto que, nesse sistema, o material de alta magnetização no núcleo é o grande responsável pela melhoria do produto energético.

As combinações macio@duro utilizando a liga de Cobalto-Ferro no núcleo não se mostraram eficazes para a melhoria do produto energético. Especificamente, quando observamos diâmetros de núcleos maiores de 9 nm o produto energético decaí drasticamente como mostra a Figura 6.

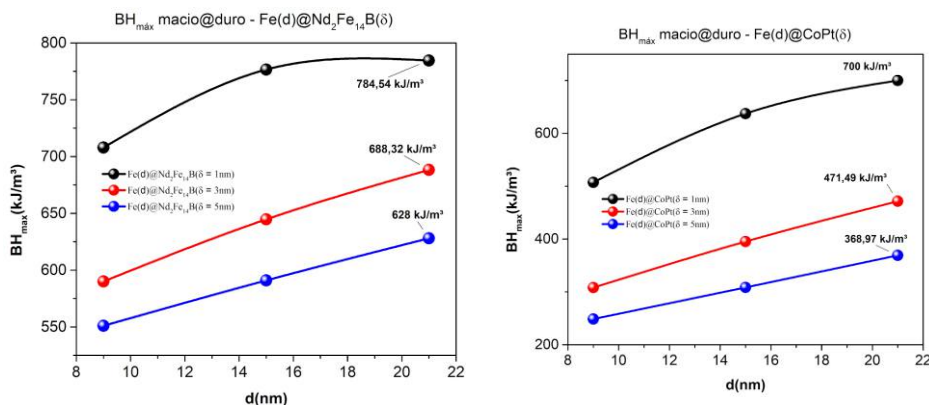
Apesar da limitada eficácia da configuração macio@duro com a liga de Cobalto-Ferro no núcleo para o aumento do produto energético, a mesma configuração combinada com o Ferro no núcleo mostrou-se eficaz.

Figura 6: Produto energético dos sistemas $\text{CoFe}_2(\text{d})@\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}(\delta)$ e $\text{CoFe}_2(\text{d})@\text{CoPt}(\delta)$



Fonte: Autores, 2024.

Figura 7: Produto energético dos sistemas $\text{Fe}(\text{d})@\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}(\delta)$ e $\text{Fe}(\text{d})@\text{CoPt}(\delta)$

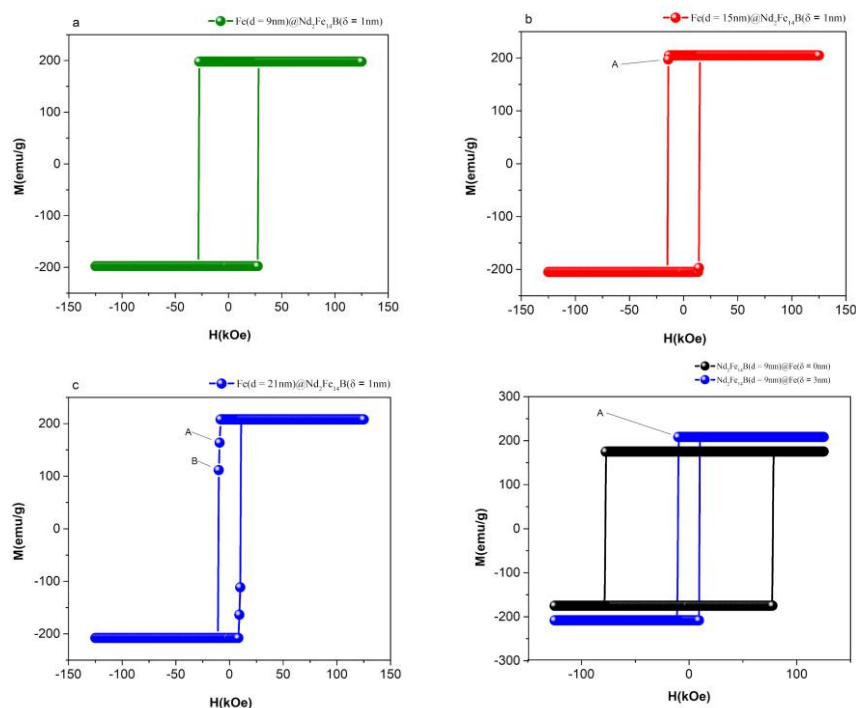


Fonte: Autores, 2024.

Os resultados indicaram que, para o diâmetro de 21 nm, as nanopartículas apresentaram os maiores produtos energéticos, exibindo uma curva crescente. Isso sugere que, para diâmetros maiores, o produto energético poderia ser ainda mais elevado, justificando uma investigação mais aprofundada em trabalhos futuros. A vantagem de explorar essa configuração com o aumento do diâmetro do núcleo é a possibilidade de melhorar o desempenho energético enquanto se aumenta a fração de um material mais barato no sistema, como o Ferro, resultando em um dispositivo mais eficiente e economicamente viável. Para essa configuração analisamos com mais profundidade a curva preta da Figura 7 do sistema $\text{Fe}@\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$.

Analisando as curvas de histerese do sistema $\text{Fe}(\text{d})@\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}(\delta = 1 \text{ nm})$, é notório o aspecto quadrado dessa configuração, o que indica que o sistema manteve uma uniformidade magnética sob condições adversas e campos de alta intensidade, contribuindo positivamente para o produto energético. As curvas de magnetização para essa espessura de casca são mostradas na Figura 8.

Figura 8: Curvas de histerese para o sistema $\text{Fe}(d = 9\text{nm}, 15\text{nm}, 21\text{nm})@ \text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}(\delta = 1\text{nm})$ e sistema $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}(d = 9\text{nm})@ \text{Fe}(\delta = 3\text{nm})$ para comparação



Fonte: Autores, 2024.

Na Figura 8.a, a curva apresenta uma magnetização de aproximadamente 198 emu/g e um campo coercivo de 27,5 kOe. À medida que o diâmetro do núcleo aumenta, observa-se um incremento na magnetização acompanhado de uma diminuição na coercividade. Na Figura 8.b, a magnetização atinge 205 emu/g, com coercividade de 14,6 kOe, enquanto a Figura 8.c exibe uma magnetização de 208 emu/g e coercividade de 10,83 kOe. Esses valores podem ser comparados ao sistema $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}(d = 9\text{ nm})@ \text{Fe}(\delta = 3\text{ nm})$, que apresentou o maior produto energético entre as simulações duro@macio apresentado na Figura 8.d. Esse sistema mostrou resultados de coercividade de 10,83 kOe e uma magnetização ligeiramente superior, em 208,4 emu/g. Esses dados sugerem que, para núcleos ainda maiores, o sistema pode apresentar uma redução no produto energético, pois o equilíbrio entre coercividade e magnetização poderia afetar negativamente a curva $B(H)$, influenciando a inclinação e retardando o ponto de desmagnetização.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante dos resultados, constatamos que nanopartículas do tipo núcleo@casca apresentaram um aumento significativo no produto energético máximo. A configuração duro@macio apresenta melhoria ao produto energético até uma espessura crítica para diâmetros de núcleos menores e para a configuração macio@duro não obtivemos o conceito de diâmetro crítico no números analisados, apenas uma curva crescente de produto energético, o que sugere uma análise mais detalhada dessa configuração, principalmente pois a maior fração de material, é do Ferro. Além disso, a constante de troca é um fator importante na análise, como vimos o Ferro apresentou os melhores produto energético e se difere principalmente da liga do cobalto-ferro por essa constante, na qual apresenta sistemas magnéticos estáveis durante a fase de reversão.

Para estudos futuros, pretendemos analisar a interação entre nanopartículas, sabendo que, em aplicações práticas, é utilizado um conjunto das mesmas, então, é de extrema importância o conhecimento da interação entre elas, como elas se comportam em campos de alta intensidade e como magnetização de uma afeta a outra. Além disso, pretendemos analisar e comparar o produto energético com o comportamento em outras formas geométricas: quadrados e cilindros, por exemplo, a fim de relacionar esses parâmetros de forma. Além disso, também gostaríamos de analisar efeitos de temperatura e interface defeituosa das nanopartículas. E, por fim, produzir trabalho prático de síntese dessas nanopartículas para observar e comparar o comportamento produzido com esse e outros trabalhos teóricos.

REFERÊNCIAS

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. Ciência e engenharia dos materiais: uma introdução. Tradução Sérgio Murilo Stamile Soares. 9. ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2016.

COEY, J. M. D.. Perspective and Prospects for Rare Earth Permanent Magnets. *Engineering*, v.6, n.2, p.119-131, 1 fev 2020.

CULLITY, B.D., GRAHAM, C.D. Introduction to magnetic materials. New Jersey: IEEE Press Editorial Board, 2009.

Dantas, A. L., Carriço, A. S., & Wysin, G. M. (2010). Vortex and Skyrmion phase diagrams in magnetic nanodisks. *IEEE Transactions on Magnetics*, 46(6), 2311-2314.

DU, Y. et al. Optimization and Design of Magnetic Ferrite Nanoparticles with Uniform Tumor Distribution for Highly Sensitive MRI/MPI Performance and Improved Magnetic Hyperthermia Therapy. *NanoLetters*. 2019.

GRANADOS-MIRALLES, C. et al. Approaching ferrite-based exchange-coupled nanocomposites as permanent magnets. *ACS Applied Nano Materials*, v. 1, n. 7, p. 3693–3704, 27 jul. 2018.

Jimenez-Villacorta, F. and Lewis, Laura, *Advanced Permanent Magnetic Materials*. “Nanomagnetism”, edited by J. M. Gonzalez, OCP Publishing, (2014), (pp.30)

KNELLER, E.F. HAWIG, R. The Exchange-Spring Magnet: A New Material Principle for Permanent Magnets. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1991.

KOVACS, A. et al. Computational Design of Rare-Earth Reduced Permanent Magnets. *Engineering*, v. 6, n. 2, p. 148–153, 1 fev. 2020.

MATERÓN, E. M. et al. Magnetic nanoparticles in biomedical applications: A review. *Applied Surface Science Advances*, v. 6, 1 dez. 2021.

Mohan, M., Sastry, M. S. M., & Rakhecha, V. C. (2008). Micromagnetic simulations of magnetization reversal in exchange-coupled hard/soft bilayer thin films. *Journal of Materials Research*, 23(7), 1849-1857.

NARASIMHAN, K. Fundamental properties of permanent magnets. In: *Modern Permanent magnets*. 1. ed. Woodhead Publisher: Elsevier, 2022. v. 1, cap. 2 p. 31-62. ISBN 978-0-323-88658-1.

NUNES, M. S. et al. Novel synthesis and physical properties of CoFe₂O₄@CoFe₂ core@shell nanostructures. *Ceramics International*, v. 49, n. 15, p. 24877–24884, 1 ago. 2023.

OLIVEIRA, L. L. et al. High-energy product SmCo₅@Fe core-shell nanoparticles. *Physical Review B*, v. 97, n. 13, 16 abr. 2018.

SHEN, B. SUN, S. Chemical Synthesis of Magnetic Nanoparticles for Permanent Magnet Applications. *Chemistry - A European Journal*. 2019.

Soares, J. M., F. F. de Oliveira, A. L. Dantas, and A. S. Carriço. (2013). Energy product enhancement and magnetic hardening in hard/soft core-shell bimagnetic cylinders. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 326, 81-85.

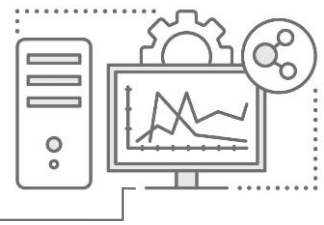
SOUZA, R. M. DE. Nucleação de paredes de domínio e produto energético máximo em nanocilindros magnéticos tipo Núcleo@Casca. Tese: Doutorado, Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2020.

Viart, N., Muller, D., & Niznansky, D. (2004). Magnetic properties of CoFe₂O₄ nanoparticles embedded in a silica matrix. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 279(1), 21-26.

YANG, Z. et al. Effects of shape Anisotropy on Hard-Soft Exchange-Coupled Permanent Magnets. *Nanomaterials*. 2022.

ZHU, K. et. al. Magnetic Nanomaterials: Chemical Design, Synthesis, and Potential Applications. *Acc. Chem. Res.* 2018.





CAPÍTULO 8

DOI: 10.63951/synapse978-65-88890-61-5_8

Arthur Ferreira de Araújo¹
Danilo Henrique de Carvalho¹
Brismark Góes da Rocha¹

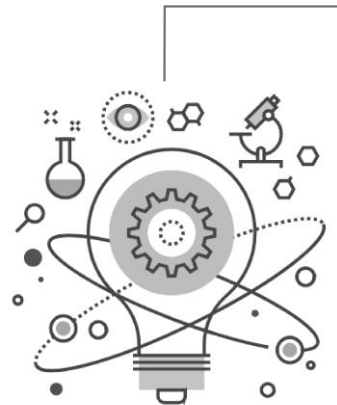
ANÁLISE DO CONSUMO DE GASOLINA EM AUTOMÓVEL COM TRÊS CILINDROS NO USO DE HIDROGÊNIO COMO COMBUSTÍVEL SECUNDÁRIO

Resumo

A busca por fontes de energia limpa é uma necessidade em virtude do aquecimento global, provocado principalmente pela utilização de combustíveis fósseis. O uso do hidrogênio concomitante à gasolina reduz a emissão de gases tóxicos, pois menos gasolina será utilizada. A combustão do hidrogênio na presença do oxigênio libera grande quantidade de energia e água no estado gasoso. Neste trabalho, foi realizado um estudo de caso com um automóvel modelo Ford Ka 16 motor de 3 cilindros utilizando hidrogênio junto à gasolina, a fim de avaliar o impacto no consumo da gasolina em diferentes níveis de amperagens (0,2, 0,3, 0,4, 0,5 e 1,0). Inicialmente, o veículo utilizou somente gasolina “grupo controle”, que posteriormente foi comparado com o consumo de gasolina ao ser utilizado juntamente ao hidrogênio. No experimento, foram realizadas cinco repetições para cada amperagem (0,5A a 1,0A), assim como no grupo controle, no qual foi utilizado somente gasolina. Para as análises, foram aplicadas as técnicas Estatísticas: Qui-Quadrado, correlação linear, F-Snedcor e regressão linear, sendo considerando nível de significância de 5%. Os testes demonstraram que não houve diferenças significativas no consumo de combustível nas amperagens utilizadas. Porém, após a substituição pela solução eletrolítica de hidróxido de sódio na concentração de 44g/l, a condutividade elétrica de 18,80mS/cm³ atingiu 149,5mS/cm³, representando um aumento de 11,62% na quilometragem média por litro de combustível quando o veículo foi conduzido em vias urbanas e rodovias a média variou entre 9km/l a 12km/l. No entanto, na condução do veículo somente em rodovias, o consumo foi de 16,12km/l.

Palavras-chave: Hidrogênio; Combustível secundário; Gerador de hidrogênio.

¹ Universidade do Estado do Rio Grande do Norte



Abstract

The search for clean energy sources is a necessity due to global warming, caused mainly by the use of fossil fuels. The use of hydrogen in conjunction with gasoline reduces toxic gas emissions, as less gasoline will be used. The combustion of hydrogen in the presence of oxygen releases large amounts of energy and water in a gaseous state. In this study, a case study was conducted with a Ford Ka 16 3-cylinder engine automobile using hydrogen together with gasoline in order to assess the impact on gasoline consumption at different amperage levels (0.2, 0.3, 0.4, 0.5, and 1.0). Initially, the vehicle used only gasoline (“control group”), which was later compared with gasoline consumption when used together with hydrogen. In the experiment, five repetitions were performed for each amperage (0.5A to 1.0A), as well as in the control group, in which only gasoline was used. For the analyses, the following statistical techniques were applied: Chi-Square, linear correlation, F-Snedcor, and linear regression, considering a significance level of 5%. The tests showed that there were no significant differences in fuel consumption at the amperages used. However, after replacing it with a sodium hydroxide electrolyte solution at a concentration of 44g/l, the electrical conductivity of 18.80mS/cm reached 149.5mS/cm, representing an increase of 11.62% in the average mileage per liter of fuel when the vehicle was driven on paved roads. cm³ reached 149.5mS/cm³, representing an increase of 11.62% in average mileage per liter of fuel when the vehicle was driven on urban roads and highways, with the average varying between 9km/l and 12km/l. However, when driving the vehicle only on highways, consumption was 16.12 km/l.

Keywords: hydrogen; secondary fuel, hydrogen generator.

INTRODUÇÃO

O uso de combustíveis fósseis geradores de gases do efeito estufa tem crescido ano após ano, o que proporciona aumento da temperatura global e contribui para o impacto ambiental. Diversos países buscam então fontes de energias mais limpas para o meio ambiente (Garcia, 2022), tendo em vista que as emissões provindas de automóveis são uma das principais fontes de gases causadores do efeito estufa em larga escala no mundo (Yu Yaowen *et al.*, 2023). Tem-se buscado, portanto, algum meio alternativo para poder atender às necessidades energéticas requeridas para abastecer novos motores com fonte energética limpa.

O hidrogênio, embora descoberto em 1766, somente recentemente e com o avanço da tecnologia passou a ser utilizado como uma fonte de energia secundária ou vetor energético, a fim de suprir suas necessidades devido ao seu potencial energético conter 2,5 vezes mais energia do que a gasolina, além do seu relativo baixo custo de obtenção comparado a outros métodos da matriz energética secundária (Souza, 2019). A utilização de corrente elétrica no processo da eletrólise tem a ação de desassociar a molécula da água que libera dois átomos hidrogênio e um oxigênio. Quando a corrente elétrica utilizada advém de fontes limpas renováveis, o hidrogênio é denominado como “hidrogênio verde” (Hassan *et al.*, 2023a). Porém, o experimento utilizou a corrente elétrica gerada pelo alternador do veículo automotivo, que é uma das transformações de energia contida na gasolina em mecânica e posteriormente transformada em energia elétrica, o que dificulta definir qual seria a cor do hidrogênio que está sendo utilizado. Porém, segundo Shalbayev *et al.* (2023) esse hidrogênio pode ser considerado marrom.

Nos últimos anos, países como o Brasil, a Alemanha, o Japão, a França, os Estados Unidos e a Austrália buscam investir no potencial do hidrogênio, em novos métodos de sua obtenção, distribuição e armazenamento para ter uma amplitude de usos em diversos setores energéticos como o automotivo e o metalúrgico (Hassan *et al.*, 2023a).

No que diz respeito ao Brasil, devido às diversas fontes de energias renováveis no território brasileiro, o governo implementou a medida do Plano Nacional do Hidrogênio (PNH₂). O PNH₂ visa incentivar investimentos e descobertas na área de hidrogênio com a finalidade de tornar o Brasil um dos principais países na geração e consumo de hidrogênio verde no mundo. Por possuir uma gama diversa de energias renováveis, o país tem uma grande possibilidade de geração desse hidrogênio. Esse tipo de energia, produzida por meio do hidrogênio, tem diversas áreas de aplicação, como a área petroquímica, siderúrgica, fábrica de cimento, obtenção da amônia, combustível, entre outros. O PNH₂ prevê a geração de energia com projetos para serem implementados e com adoção em larga escala nos próximos anos (Freitas, 2022).

Há três formas de utilização do hidrogênio no abastecimento automotivo: a primeira pelo método de recarregamento de baterias elétricas por meio de membrana de troca de prótons em automóveis elétricos; a segunda, na combustão de automóveis pelo método de injeção de hidrogênio como um combustível secundário; a terceira, quando o motor tenha seus ajustes próprios para suportar as altas pressões necessárias quanto ao uso apenas do hidrogênio, isto é, o hidrogênio sendo um combustível primário (Albatayneh *et al.*, 2023).

Pesquisas já foram feitas em simulações para se obter uma perspectiva de como o hidrogênio poderia influenciar um motor em diferentes aspectos (Falfari *et al.*, 2023). No entanto, cabe também a análise sobre qual o efeito que o uso do hidrogênio teria em um motor diferente dos quais teve a pesquisa de Falfari *et al.* (2023), centrada em uma ideia mais abrangente quanto ao impacto do hidrogênio em automóveis e em investigar, na prática, qual seria o efeito no consumo de gasolina quando utilizado o hidrogênio em um veículo automotivo modelo Ford Ka 16 motor de 3 cilindros?

Para responder esta pergunta, foi realizada uma pesquisa do tipo experimental. Dizemos ser pesquisa experimental por se tratar de um estudo que analisa especificamente um modelo de motor de carro em meio a múltiplos modelos escolhidos em outras pesquisas. Segundo Gil (2002 p. 47), “essencialmente, a pesquisa experimental consiste em determinar um objeto de estudo, selecionar as variáveis que seriam capazes de influenciá-lo, definir as formas de controle e de observação dos efeitos que a variável produz no objeto”. Foi então escolhido tal automóvel, pela disponibilidade do veículo objeto do estudo pelo seu proprietário, um carro do modelo Ford Ka modelo 2016, com um motor de 3 cilindros TI-CVT.

2. O USO DE HIDROGÊNIO EM AUTOMÓVEIS

Tendo em vista o acréscimo de investimentos na área do hidrogênio para aumentar a sua produção e adoção mundialmente para diversos setores enquanto uma fonte energética alternativa e um vetor energético (Hassan *et al.*, 2023a; Freitas, 2022), iremos exemplificar algumas das formas de geração do hidrogênio e como elas são utilizadas para o abastecimento de automóveis. Serão mostradas também as dificuldades e os benefícios que se tem ao utilizar o hidrogênio em motores de combustão interna.

2.1 DIFERENCIANDO OS TIPOS DE HIDROGÊNIO E SEUS USOS

O hidrogênio, por ser retirado da desassociação de moléculas da água, separando o oxigênio do hidrogênio possui múltiplas formas que podem ser utilizadas para fazer essa desassociação que necessita de uma energia externa para

ocorrer, seja utilizando a eletrólise pelo método da gaseificação, ou por outros métodos de obtenção apresentados a seguir, segregando em cada cor atribuída (Hassan *et al.*, 2023a).

As fontes energéticas utilizadas para a geração do hidrogênio são o que define a “cor” do hidrogênio. Apesar de ser um gás incolor, cada coloração se atribui pela fonte energética primária utilizada para obter o hidrogênio, sendo ele considerado uma fonte energética secundária ou um vetor energético (Hassan *et al.*, 2023a).

Conforme a Figura 01, hidrogênio preto consiste em hidrogênio obtido por meio do uso da gaseificação mineral com minerais como antracito; marrom para hidrogênio com uso da gaseificação do carvão mineral com o lítio; cinza quando é utilizado o processo de reformação a vapor de gás natural sem coleta de gás carbônico Carbon Capture Utilization and Storage (CCUS); azul para reformação a vapor de gás natural com coleta de CCUS; turquesa para uso da pirólise do metano sem geração de CO²; e verde para uso de eletrólise da água com energias renováveis eólica e/ou solar (Santos, 2023). Ademais, Santos (2023) coaduna com a definição de Brothe (2020).

A cor do hidrogênio que foi produzida no gerador instalado no veículo da pesquisa experimental classifica-se como marrom (Shalbayev, 2023). Entretanto, ao ser comparado com as fontes Santos (2003) e Brother (2020), é possível observar que a cor marrom é atribuído quando se faz uso do carvão mineral, o que não ocorre com a produção do gerador instalado no veículo, pois a energia primária utilizada no gerador é oriunda da bateria do veículo a qual é alimentada pelo alternador. Sendo assim, não foi possível identificar com precisão a real cor do hidrogênio produzida nesta pesquisa.

Em função de o hidrogênio ser uma fonte de energia secundária que pode ser armazenada tanto em sua forma gasosa quanto em sua forma líquida, pode ser utilizado como fonte energética de diferentes setores. Algumas das áreas que se mostram disponíveis para a adoção do hidrogênio na matriz energética seriam na metalúrgica, para uso nas caldeiras, no setor de combustíveis alternativos e no setor automobilístico (Hassan *et al.*, 2023a), assim como para a exportação.

O uso do hidrogênio em automóveis se dá pelo menos de duas formas. Uma das formas é como fonte de energia elétrica em baterias (células de combustível) de veículos elétricos, que pode ser utilizado o hidrogênio no seu estado gasoso para transferir elétrons para a bateria, ou no uso do gás de hidrogênio para ser injetado no motor junto de outros combustíveis para tirar proveito do potencial energético elevado do hidrogênio e sua baixa energia de ignição: 0,019 mJ. Outra forma possível é utilizá-lo como combustível primário em motores a combustão apropriados para suportarem as altas pressões e temperatura (Durkin, 2024; Souza, 2009).

Figura 01 - Esquema das diferentes fontes e cores do hidrogênio

Cor	Resumo do processo de produção do hidrogênio
Preto	Gaseificação do carvão mineral (antracito) sem CCUS
Marrom	Gaseificação do carvão mineral (Lignito/Linhito/Hulha) sem CCUS
Cinza	Reforma a vapor do gás natural sem CCUS
Azul	Reforma a vapor do gás natural com CCUS
Turquesa	Pirólise do metano sem geração de CO ₂
Verde	Eletrolise da água com energias de fontes renováveis (eólica/solar)
Musgo	Reformas catalíticas, gaseificação ou biodigestão anaeróbica de biomassa ou biocombustíveis, com ou sem CCUS
Rosa	Energia nuclear como fonte
Amarelo	Energia da rede elétrica, composta por diversas fontes
Branco	Extração do hidrogênio natural ou geológico

Fonte: Santos (2023).

No Quadro 01 consta a comparação entre o hidrogênio, o metano e a gasolina e a sua relação com alguns aspectos relevantes para a combustão, como a energia mínima de ignição que o hidrogênio possui, que é a menor dentre os três combustíveis. A velocidade de propagação da chama do hidrogênio possui a maior velocidade, podendo ocorrer ignição antes do tempo com maior facilidade e a temperatura de autoignição do hidrogênio ser maior por possuir um poder calorífico elevado.

Quadro 01 - Comparação de hidrogênio com Gasolina e Metano

Propriedades	H ₂	CH ₄	Gasolina
Temperatura de autoignição (°C)	585	540	228-501
Temperatura de chama (°C)	2.045	1.875	2.200
Limite de ignição no ar (% v.)	4-75	5,3-15	1,0-7,6
Energia mínima de ignição (mJ)	0,02	0,29	0,24
Velocidade de propagação da chama no ar (m/s)	2,65	0,4	0,4
Coefficiente de difusão no ar (cm ² /s)	0,61	0,16	0,05
Toxicidade	Não	Não	Sim

Fonte: Adaptado de Souza (2009).

Para o uso do hidrogênio em motores a combustão interna se diferencia de duas formas principais. Utilizando o hidrogênio como o combustível primário do motor, o qual necessita de uma adaptação ou de um motor feito para este objetivo ou quando não utilizado de forma primária, o hidrogênio pode ser usado como um combustível secundário sendo injetado com outros combustíveis (Falfari *et al.*, 2023).

2.2 GERADOR DE HIDROGÊNIO UTILIZADOS EM MOTORES À COMBUSTÃO INTERNA

O método de acréscimo de hidrogênio a motores de combustão interna tradicionais que utilizam combustíveis fósseis ou gás natural se dá de diversas formas, apresentando as suas vantagens e suas desvantagens de uso, dependendo do modelo de motor utilizado (Shadidi; Najafi; Yusaf, 2021).

Quando se utiliza hidrogênio como combustível direto do motor, é necessário fazer alterações físicas no sistema de combustão para que possa comportar o hidrogênio, como válvulas e tubulações novas para suportar pressões maiores e uma câmara de combustão e sistema de faísca nova para suportarem o aumento de pressão do gás e evitar uma combustão indevida. Já quando se é utilizado como combustível secundário, haveria a possibilidade de reduzir a dependência de combustíveis fósseis para ter um impacto no quadro econômico de combustíveis e na redução de emissões de gases prejudiciais ao efeito estufa (Shadidi; Najafi; Yusaf, 2021).

No que diz respeito ao uso de hidrogênio em motores a combustão, pode-se diferenciá-lo pela forma de injeção de hidrogênio com um tanque de hidrogênio instalado, sendo o hidrogênio armazenado para fazer a injeção do gás de diferentes formas que serão apresentadas a seguir, ou da forma de instalar um gerador de hidrogênio no veículo e utilizar tal geração de hidrogênio para ajudar a abastecer o carro com um combustível secundário juntamente ao combustível primário em motores a combustão interna, como a gasolina.

Não há apenas um método para fornecer corrente elétrica a um gerador de hidrogênio, porém as mais comuns de serem utilizadas são a de utilizar a eletrólise com a corrente da bateria e do gerador para realizar a eletrólise (Shalbayev *et al.*, 2023). A utilização da eletrólise no gerador de hidrogênio requer uma amperagem menor para evitar que a reação gere apenas água fervente, o gerador requererá o uso de água alcalina, que é uma mistura suficiente de metais para obter uma geração de hidrogênio suficiente, em que se pode utilizar uma solução de hidróxido de potássio ou hidróxido de sódio. Por meio do método da eletrólise, se obteve em outra pesquisa (Shalbayev *et al.*, 2023) uma eficiência na redução do consumo de combustível entre 8,4% até 43,6%, dependendo de qual condição o veículo está sendo dirigido, tendo uma melhor eficiência quando está sendo usado em rodovias com uma solução eletrolítica elevada de hidróxido de potássio no gerador.

Um outro método que pode ser aplicado a um gerador de hidrogênio é de quando ele fornece hidrogênio ao motor concomitante ao combustível primário. Nesse caso, é utilizada uma mistura com a gasolina, que obteve um resultado entre 33% e 38% de eficiência quando comparado ao uso somente de gasolina, fator esperado devido o alto poder de combustão do hidrogênio e seu potencial de queima, que corrobora a reação de queima da gasolina e contribui para maior eficiência da velocidade de queima utilizando menos gasolina (Campos A; Pinto F; Alves T. 2019).

3. METODOLOGIA

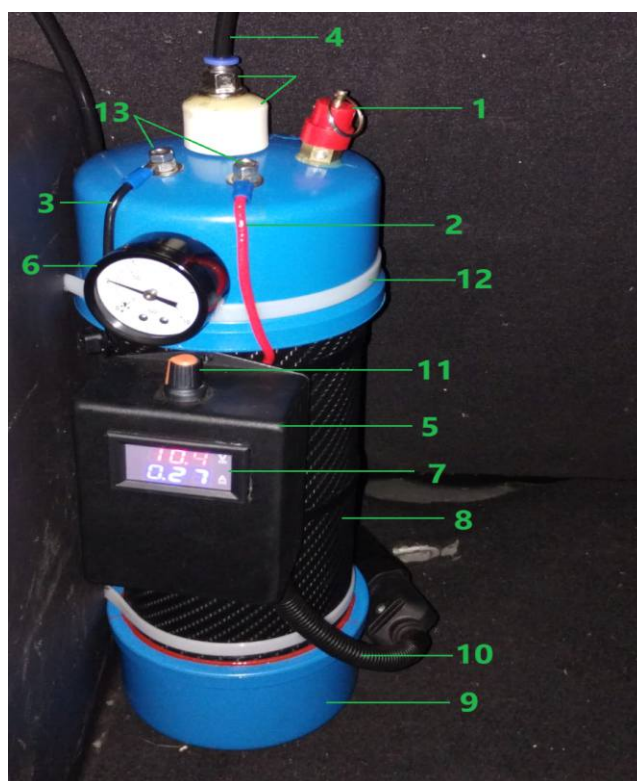
Na pesquisa, foram registradas a distância (km) percorrida pelo veículo, utilizando apenas a gasolina como referencial para que possa comparar com o uso do hidrogênio com corrente elétrica (A) variada (0,2, 0,3, 0,4, 0,5 e 1,0). Para as análises foram usadas as ferramentas de testes da Estatística considerando um nível de significância de 5%: correlação linear Pearson, Regressão Linear, F-Snedcor, e teste Qui-Quadrado. Também foram analisados os parâmetros de média e desvio padrão do consumo de gasolina.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Tendo em vista as diferentes formas de utilização do hidrogênio em um automóvel, a forma que foi utilizada neste experimento foi de um gerador de hidrogênio na mala do veículo mostrado na Fotografia 01, sendo o hidrogênio combustível secundário e a gasolina combustível primário. As conexões da tubulação do gerador e do tanque de combustível são mostrados na Fotografia 02.

A Fotografia 01 corresponde ao gerador de hidrogênio que foi utilizado no experimento. Para melhor entendimento e identificação, cada componente externo do gerador foi numerado. O número 1 corresponde à válvula de alívio que, ao atingir acima de 6 psi, o gás hidrogênio será liberado; os números 2 e 3 referem-se aos fios condutores de corrente elétrica para catodo(+) e anodo(-). Em 4 mostra a tubulação de saída do hidrogênio gerado para a tubulação de saída de combustível do tanque para o motor; 5 é o Pulse Width Modulation (PWM), que controla a corrente elétrica que chega ao gerador; 6 é o manômetro analógico para que seja possível visualizar a pressão interna do gerador; 7 é o visor do PWM indicando a tensão e amperagem utilizado no gerador; 8 e 9 são respectivamente o revestimento do gerador e a estrutura de base em pvc; 10 é o cabo de alimentação elétrica do gerador advindo da bateria revestido com conduíte; 11 é seletor de amperagem do PWM; 12 fita Hallermann; 13 é o conector de entrada de corrente elétrica para os eletrodos.

Fotografia 01: Gerador de hidrogênio instalado no veículo.

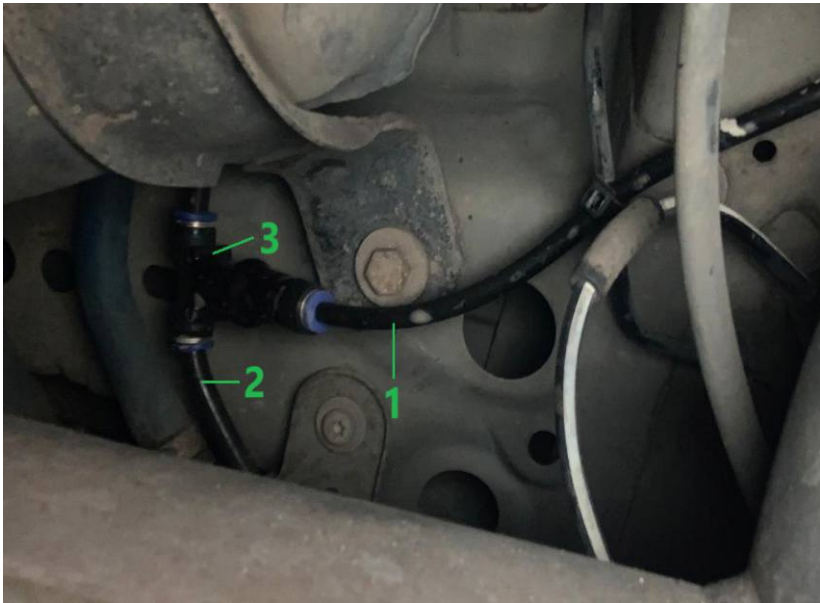


Fonte: Autores (2024).

Na Fotografia 02, temos: o número 1 corresponde a tubulação de saída do hidrogênio do gerador (corresponde ao número 4 da fotografia 01); 2 a tubulação de saída de combustível do tanque e 3 a conexão do tipo “T” após o filtro de combustível na tubulação advindo do tanque de combustível.

A fim de comparar o efeito da variação da densidade de corrente elétrica no gerador de hidrogênio, foi adotado um “grupo controle”, isto é, o veículo sendo conduzido somente a gasolina. Estando o tanque de combustível do veículo cheio, o veículo foi conduzido em vias urbanas e estradas, depois foi preenchido o tanque e posteriormente calculado a razão entre quilômetros por litro (km/l), procedimento com cinco repetições, estando os dados registrados no Quadro 02.

Fotografia 02 : Tubulações do gerador e tanque de combustíveis



Fonte: Autores (2024).

Quadro 02 - Dados com funcionamento do motor somente com a gasolina (Grupo controle)

Consumo (km/l)	Distância percorrida (km)	Quantidade de combustível abastecido (l)
10,23	133	13
11,18	190	17
11,54	150	13
8,9	89	10
12,33	74	6

Fonte: Autores (2024).

Após estabelecido o grupo controle, iniciou-se o uso do gerador de hidrogênio tendo cada densidade de corrente elétrica com cinco repetições, iniciando com 0,2A, posteriormente foi acrescido de uma variação na amperagem de 0,1A até 0,5A, onde o veículo funcionou concomitante a gasolina (combustível principal). A cada incremento da amperagem, aumenta também a quantidade de hidrogênio gerado e enviado à tubulação que sai do tanque de combustível, o que juntamente a gasolina é levado ao motor do veículo. Como as diferenças nos consumos da gasolina não eram estatisticamente significativas, foi aumentada a amperagem de 0,5A para 1.0A, posteriormente foi produzida uma solução eletrolítica com 44g/L de hidróxido de sódio e realizada a substituição da solução. No Quadro 03, consta o registro dos resultados obtidos com as variações de corrente elétrica.

Quadro 03 - Consumo de gasolina com o hidrogênio

Níveis de Corrente elétrica (A)	Consumo (km/l)	Distância percorrida (km)	Quantidade de combustível abastecido (l)
0,2	11,09	122	11
0,2	11,55	127	11
0,2	11,75	94	8
0,2	11,68	257	22
0,2	11,96	574	48
0,3	10,56	95	9
0,3	11,36	125	11
0,3	10,8	108	10
0,3	12,14	255	21
0,3	10,59	360	34
0,4	11,15	446	40
0,4	10,65	181	17
0,4	10,85	141	13
0,4	11,50	115	10
0,4	10,71	182	17
0,5	10,8	108	10
0,5	10,73	161	15
0,5	10,13	81	8
0,5	10,63	170	16
0,5	9,25	111	12
1,0	11,13	523	47
1,0	10,89	196	18
1,0	11,34	431	38
1,0	11,08	432	39
1,0	11,06	188	17

Fonte: Autores (2024).

Todos os níveis de corrente foram comparados com o grupo controle, após a substituição da solução foi realizada a verificação da condutividade elétrica. Assim, foi observado que a solução de hidróxido de sódio possui uma condutividade de 149,5 milisiemens por centímetro cúbico (mS/cm^3) em comparação com a solução inicial que possuía $18,80\text{mS}/\text{cm}^3$, isto é, a solução eletrolítica de hidróxido de sódio apresentou 7 vezes mais eficiência do que a fornecida inicialmente. Posteriormente, o experimento foi realizado com uma corrente de 1,0 A. Os registros dos testes de quilometragem usados nesta nova solução estão disponíveis no Quadro 04.

Segundo Shalbayev *et al.* (2023), quando o uso do hidrogênio é feito em veículo no deslocamento em rodovias, apresenta uma melhor eficiência. A ser observado no Quadro 04, no registro de 16,11 km/l foi verificado que o condutor do veículo realizou uma viagem de 260 km a uma velocidade média de 120 km/h comparado com a média de consumo da gasolina em vias urbanas (não rodovias), de 11,5 km/l com densidade de 1,0A, apresentou uma eficiência a mais de 28,4%. Isto é, coaduna com os achados de Shalbayev *et al.* (2023).

Quadro 04 - Consumo de gasolina com o uso da solução eletrolítica de hidróxido de sódio

Corrente elétrica (A)	Consumo (km/l)	Distância percorrida (km)	Quantidade de combustível abastecido (l)
1,0	16,11*	580	36
1,0	11	154	14
1,0	11,84	296	25
1,0	12,14	340	28
1,0	10,81	173	16

Fonte: Autores (2024)

* Uso do gerador em rodovia.

Com os dados obtidos, foram realizados testes de correlação linear (tabela 01) sendo possível observar que, para a solução inicial, houve correlação linear entre as variáveis km e Amperagem de 0,4213 ($p \leq 0,0200$), fraca e diretamente proporcional. Já na tabela com a nova solução, há presença de correlação linear entre as variáveis: km e consumo de 0,5164 ($p \leq 0,0010$) e entre km e Amperagem de 0,4451 ($p \leq 0,0070$), ambas correlações fracas e diretamente proporcionais.

Tabela 01 - Resultado da correlação linear com a solução eletrolítica inicial.

Variáveis	Km	Consumo(km/l)	Amperagem(A)
Km	1,0000	0,2824	0,4213
	$p \leq - -$	$p \leq 0,131$	$p \leq 0,02000$
Consumo(km/l)	0,2824	1,0000	-0,0548
	$p \leq 0,13100$	$p \leq - -$	$p \leq 0,77400$
Amperagem(A)	0,4213	-0,0548	1,0000
	$p \leq 0,02000$	$p \leq 0,7740$	$p \leq - -$

Fonte: Autores (2024).

Tabela 02 - Correlação linear da solução de hidróxido de sódio.

Variáveis	Km	Consumo(km/l)	Amperagem(A)
Km	1,0000 $p \leq - -$	0,5164 $p \leq 0,00100$	0,4451 $p \leq 0,00700$
Consumo(km/l)	0,5164 $p \leq 0,00100$	1,0000 $p \leq - -$	0,2349 $p \leq 0,17400$
Amperagem(A)	0,4451 $p \leq 0,00700$	0,2349 $p \leq 0,17400$	1,0000 $p \leq - -$

Fonte: Autores (2024).

Na Tabela 03, consta o resultado da aplicação da técnica de regressão linear. Analisando a tabela, obteve-se a Equação 01, a qual não deve ser aceita como uma função linear, pois o resultado teste F-Snedcor apresenta uma probabilidade $p \leq 0,18802$, maior do que o nível de significância (0,5%). Não é recomendado fazer uso da função para realizar estimativas uma vez que o poder explicativo do modelo (R^2) explica em 5,1% de toda variação do consumo (km/l), o que significa que 94,9% são atribuídos a outros fatores desconhecidos.

A coluna p-valor indica que os coeficientes angulares (0,00196 e -0,49512) não são estatisticamente diferentes de zero e o coeficiente linear (10,77545) de fato é estatisticamente diferente de zero, pois o p-valor é menor do que 0,05. O coeficiente da amperagem negativa indica que à medida em que aumenta a amperagem, ocorre uma redução na relação km/l, o que não faz sentido, pois quanto maior a corrente elétrica maior será a produção de hidrogênio.

Na Tabela 04, o resultado da aplicação da técnica da regressão linear realizado após a mudança da solução sugere que o modelo seja correspondente ao encontrado na Equação 02. Observando a probabilidade do Teste F-Snedcor, pode-se concluir que o modelo de fato é linear, pois p é menor que 5%, entretanto ao analisar a qualidade do ajuste do modelo por meio de $R^2 = 0,22083$, é possível concluir que não é um modelo bem ajustado, pois as variáveis de Km e Amperagem explicam que 22,08% de toda variação do consumo da gasolina e 77,92% são atribuídos a fatores aleatórios, isto é, há outros fatores que influenciam o consumo de gasolina além da quilometragem e a amperagem utilizada no gerador.

Tabela 03 - Aplicação da regressão linear com a solução eletrolítica inicial

	β_i	<i>p-valor</i>
Coefficiente linear	10,77545	0,00000
Km	0,00196	0,07355
Amperagem	-0,49512	0,75008
Teste F-Snedcor $p \leq 0,18802$. Ajuste do $R^2 = 0,050990$ - e N = 30.		

Fonte: Autores (2024).

Equação 01 - Modelo de regressão linear com a solução inicial:

$$\text{Consumo(km/l)} = 10,77545 + 0,00196\text{km} - 0,49512\text{Amperes}$$

Tabela 04 - Aplicação da regressão linear da solução de hidróxido de sódio

	β_i	<i>p-valor</i>
Coefficiente linear	10,30328	0,00000
Km	0,00393	0,00471
Amperagem	0,01939	0,97078

Teste F-Snedcor $p \leq 0,00700$ Ajuste do $R^2 = 0,22083$ e $N = 35$.

Fonte: Autores (2024).

Equação 02 - Modelo de regressão linear com a solução de hidróxido de sódio:

$$\text{Consumo}(km/l) = 10,30328 + 0,00393Km + 0,01939\text{Amperagem}$$

Após as etapas de correlação e regressão linear, foi utilizado o método não paramétrico Qui-Quadrado com nível de significância de 5%, com objetivo de identificar possíveis diferenças significativas no consumo de gasolina considerando a variação da amperagem.

Os dados obtidos foram registrados no Quadro 05, que mostra a comparação entre os níveis de amperagem e a sua probabilidade correspondente de refutar a hipótese de que existe diferença significativa em relação ao grupo controle. É observado que não há evidências suficientes para rejeitar a hipótese da diferença em cada comparação, pois todas as probabilidades são superiores ao nível de significância (5%), isto é, as diferenças no consumo de gasolina (km/l) não são significativas, porém, no uso da nova solução provocou-se um resultado mais aproximado de se ter uma significância, mostrando maior eficiência.

Quadro 05 - Resultado do teste Qui-Quadrado, comparação da corrente elétrica em função da relação km/litro

Corrente elétrica (A)	<i>p-valor</i>
0,0 x 0,2	0,94229
0,0 x 0,3	0,87541
0,0 x 0,4	0,91264
0,0 x 0,5	0,81739
0,0 x 1,0	0,95645
0,0 x 1,0*	0,51950

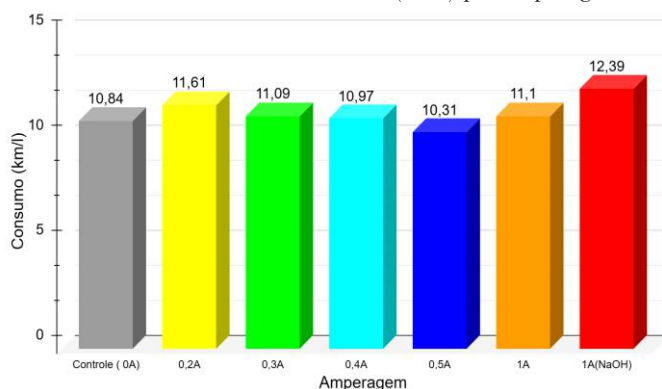
Fonte: Autores (2024).

* Mudança da solução eletrolítica, 44g/l de hidróxido de sódio.

O gráfico 01 representa a média do consumo de gasolina considerando a amperagem fornecida ao gerador de hidrogênio. É observado que a média de consumo (km/l) é próxima ao que já foi reforçado no resultado do teste Qui-Quadrado. Embora as diferenças não sejam significativas, é observado que quando houve mudança da solução eletrolítica no experimento com 1,0A ocorreu um acréscimo de 11,63% na média. Foi percebido que todas as amperagens testadas

tiveram um aumento mesmo que pequeno em comparação ao grupo controle com relação à média do consumo (km/l), mostrando que o hidrogênio possui sim um efeito positivo no aumento da quilometragem por litro de gasolina. Entretanto, na amperagem de 0,5, apresenta um rendimento de 4,9% inferior ao grupo controle que pode ser atribuída possivelmente a um fluxo de veículos na via em horário mais intenso e/ou alguma mudança na forma de conduzir o veículo.

Gráfico 01 - Média de consumo (km/l) por amperagem



Fonte: Autores (2024).

Por terem sido observadas diferenças que a amperagem teve no consumo (km/l), procurou-se também fazer a análise de desvio padrão, para verificar o quanto de variação os resultados tiveram dentre cada amperagem, a fim de encontrar a amperagem que obteve maior dispersão dentre os dados coletados, como apresentado no Quadro 06. Observa-se, portanto, que mesmo com o melhor consumo (km/l) no uso de 1,0 A com a solução de NaOH, se teve o maior desvio padrão, o que possivelmente se dá por ter sido conduzido o veículo em rodovia e áreas urbanas, tendo o uso de 1,0 A com a solução inicial como o mais constante em relação a sua média de consumo.

Quadro 06 - Desvio padrão do consumo(km/l) em relação a amperagem

Amperagem	0	0,2	0,3	0,4	0,5	1,0	1,0*
Desvio padrão	1,18	0,29	0,60	0,32	0,58	0,15	1,92

Fonte: Autores (2024).

Tendo em vista tais resultados, o experimento revela ser necessário buscar mais resultados futuros com amperagens maiores e com uma solução eletrolítica adequada para que seja possível ter um modelo mais apropriado que explique o comportamento que a amperagem e o uso do hidrogênio teria no consumo (km/l) do veículo, já que com os valores até 1,0 A se mostrou que há sim uma alteração na quilometragem, porém não de uma forma significativa.

Na observação para 1,0 A, tendo como registro o valor correspondente a 16,11 km, ocorreu a situação em que o veículo foi utilizado para uma viagem de 260 km com velocidade média de 120 km, os demais valores referem-se à circulação do veículo em área urbana e parte em rodovias.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao analisar o impacto da utilização do hidrogênio como um combustível secundário em um motor movido à gasolina, não foi encontrado diferença significativa no consumo de gasolina nas amperagens utilizadas. O veículo foi conduzido em vias urbanas na grande maioria das vezes e em alguns momentos nos trajetos em rodovias e áreas urbanas, tal variável não foi possível ser controlada, devido a disponibilidade do veículo, mas em uma situação em que o carro foi conduzido somente em rodovias foi percebido o aumento significativo da quilometragem por litro da gasolina, 16,11 km/l, o que dialoga com os achados de Shalbayev *et al.* (2023)

A solução de hidróxido de sódio na concentração de 44g/L teve desempenho na condutividade elétrica de 149,5 (mS/cm³), que corresponde ao melhor rendimento obtido. Assim sendo, visto os resultados encontrados, o hidrogênio mostrou ter um potencial para reduzir o consumo de gasolina no veículo escolhido, uma vez que poderia oferecer diversos benefícios econômicos em relação à gasolina; uma melhor autonomia e uma possível redução nas emissões de gases poluentes devido à diminuição do uso de gasolina caso tenha amperagens adequada, bem como uma solução de eletrolítica. Por fim, entende-se que os resultados deste experimento são sugestivos para que sejam realizados estudos futuros voltados para outros veículos e com novas amperagens e análises do uso de hidrogênio em rodovias e em áreas urbanas.

REFERÊNCIAS

Albatayneh, A et al. Future of Electric and Hydrogen Cars and Trucks: An Overview. *Energies* 2023, 16, 3230. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en16073230>.

Bothe, D. Green, blue hydrogen – Potentials and security of supply. *Frontier economics*, 2020. Disponível em: <https://www.frontier-economics.com/media/4258/prs-bothe-green-blue-hydrogen-potential-and-security-of-supply-en-stc.pdf>. Acesso em: 21 de set. de 2024.

Campos, A; Pinto F; Alves T. Hydrogen generator, an application with internal combustion engines. *Ijaers.com*, v. 6, n. 11, 12 nov. 2019.

Durkin, Kirill et al. Hydrogen-Powered Vehicles: Comparing the Powertrain Efficiency and Sustainability of Fuel Cell versus Internal Combustion Engine Cars. *Energies* 2024, 17(5), 1085; Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en17051085>.

Falfari, S et al. Hydrogen Application as a Fuel in Internal Combustion Engines. *Energies* 2023, 16, 2545. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en16062545>.

Freitas, G .Hidrogênio verde: estudo de caso sobre o potencial brasileiro como exportador para união europeia utilizando programação linear. TCC (Graduação em engenharia de produção) - Universidade Federal Fluminense. Rio de Janeiro, p. 63. 2022.

Garcia, J, V, da S. Hidrogênio Verde: Estudo de Caso do Brasil. TCC (Monografia em Engenharia de Bioprocessos) - Unidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 117. 2022.

Gil, A. C. Como elaborar projetos de pesquisa. São paulo, Atlas S.A, 2002.

Hassan Q et al., Green hydrogen: A pathway to a sustainable energy future, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023 (A). Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.08.321>.

Hassan, Q et al. Hydrogen Fuel Cell Vehicles: Opportunities and Challenges. *Sustainability* 2023 (B), 15. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su151511501>.

Santos, A. B. P. As formas de produção de hidrogênio. Mitsidi. São paulo, 02 fevereiro de 2023. Disponível em <https://mitsidi.com/as-formas-de-producao-de-hidrogenio/>. Acesso em: 15 de jun de 2024.

Souza, M, M, V, M. Tecnologia do hidrogênio. Rio de Janeiro, Synergia, 2009.

Souza, M, M, V, M. Hidrogênio e células de combustível. Rio de Janeiro, Synergia, 2019.

Shadidi, B.; Najafi, G.; Yusaf, T. A Review of Hydrogen as a Fuel in Internal Combustion Engines. *Energies* 2021, 14, 6209, Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en14196209>.

Shalbayev et al, Hydrogen generator for internal combustion ENGINE. *Journal of Applied Research and Technology* 21, 2023, Disponível em: <<https://jart.icat.unam.mx/index.php/jart/article/view/1963/1023>>.

Yu Yaowen et al., Low-carbon scheduling of integrated hydrogen.



CAPÍTULO 9

DOI: 10.63951/synapse978-65-88890-61-5_9

Joelma Gleciene G. do N. Andrade¹

Ellen Gomes Silva¹

Natália Sabrina de Lima Nunes¹

Maria de Fátima Vitória de Moura²

Thalita Queiroz e Silva²

Lília Basilio de Caland¹

ANÁLISE DE PARÂMETROS DE QUALIDADE DE FARINHA DE RESÍDUOS FRIGORÍFICOS PARA USO EM DIETAS AVÍCOLAS

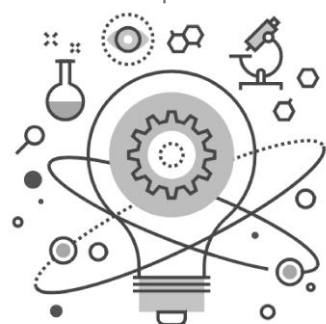
Resumo

Este estudo analisa a qualidade da farinha de carne e ossos (FCO), subproduto de resíduos frigoríficos amplamente utilizado na nutrição animal. O tema é relevante diante da crescente demanda por fontes de proteína acessíveis e sustentáveis, aliada à necessidade de reduzir custos na produção avícola e mitigar impactos ambientais. O aproveitamento adequado desses resíduos representa uma alternativa econômica e ambientalmente correta, evitando descarte inadequado e desperdícios. Assim, o objetivo do trabalho foi avaliar os parâmetros indicadores de qualidade da FCO produzida pela empresa Indama. Foram realizadas análises físico-químicas, incluindo umidade, acidez, extrato etéreo, índice de saponificação, proteína bruta e quantificação mineral (Ca, P, Fe, Na e K), comparando os resultados com uma ração comercial. Os métodos utilizados compreenderam determinação de umidade por secagem, quantificação de proteínas pelo método Kjeldahl e análise mineral por ICP-OES. Os resultados mostraram que a FCO atende a alguns requisitos da legislação brasileira, apresentando teores adequados de proteína e minerais, além de teores de extrato etéreo e saponificação. Conclui-se que a FCO é alternativa sustentável e eficiente, com benefícios econômicos, ambientais e nutricionais na formulação de rações avícolas.

Palavras chave: Alimentação avícola; Farinha de carne e ossos; Composição química; Controle de Qualidade.

¹ Universidade do Estado do Rio Grande do Norte

² Universidade Federal do Rio Grande do Norte



Abstract

This study analyzes the quality of meat and bone meal (MBM), a by-product of slaughterhouse waste widely used in animal nutrition. The topic is relevant in view of the growing demand for affordable and sustainable protein sources, coupled with the need to reduce poultry production costs and mitigate environmental impacts. The proper use of this waste represents an economical and environmentally friendly alternative, avoiding improper disposal and waste. Thus, the objective of this study was to evaluate the quality indicators of MBM produced by the company Indama. Physical-chemical analyses were performed, including moisture, acidity, ether extract, saponification index, crude protein, and mineral quantification (Ca, P, Fe, Na, and K), comparing the results with a commercial feed. The methods used included moisture determination by drying, protein quantification by the Kjeldahl method, and mineral analysis by ICP-OES. The results showed that FCO meets some requirements of Brazilian legislation, presenting adequate levels of protein and minerals, in addition to levels of ether extract and saponification. It is concluded that FCO is a sustainable and efficient alternative, with economic, environmental, and nutritional benefits in the formulation of poultry feed.

Keywords: *Poultry feed; Meat and bone meal; Chemical composition; Quality control.*

INTRODUÇÃO

A formulação de rações para aves possui elevado custo, principalmente devido ao uso de fontes proteicas e minerais, como o farelo de soja e suplementos de fósforo (Rostagno *et al.*, 2017). Como alternativa, farinhas de origem animal — de penas, vísceras, carne e ossos — destacam-se pelo alto valor nutricional e potencial para reduzir a dependência de insumos mais caros (Souza, 2005; ABRA, 2020).

Esses subprodutos apresentam variações na composição e nas características físico-químicas, influenciadas pelo tipo de resíduo e pelas condições de processamento, podendo conter elevados teores de proteína bruta, cálcio e fósforo, essenciais à nutrição animal (Bellaver; Zanotto, 2004; Machado *et al.*, 2021 apud Tiritan, 2022). Além do valor nutricional, contribuem para a sustentabilidade, transformando cerca de 3,3 milhões de toneladas anuais de resíduos frigoríficos em ingredientes de valor agregado (Embrapa, 2021).

Na alimentação de aves, essas farinhas atendem às exigências nutricionais e favorecem a absorção de minerais e vitaminas (Pessôa *et al.*, 2012; Calderano *et al.*, 2024). Contudo, a qualidade depende do controle da matéria-prima e do processamento, que influenciam a estabilidade e o aproveitamento nas dietas (Bellaver, 2001 apud Giongo, 2017; Butolo, 2002).

Dessa forma, este estudo avalia a qualidade físico-química da farinha de carne e ossos produzida pela empresa Indama, com base em parâmetros como proteína bruta, umidade, extrato etéreo, acidez e minerais, visando sua aplicabilidade em rações avícolas e a promoção de práticas mais econômicas e sustentáveis na produção animal.

2. PARÂMETROS DE QUALIDADE DA FARINHA DE CARNE E OSSOS PROVENIENTE DE RESÍDUOS FRIGORÍFICOS PARA A NUTRIÇÃO DAS AVES

Neste tópico, serão discutidos conceitos essenciais para melhor compreensão do objeto de estudo, as quais serão apresentadas as fundamentações teóricas que sustentam nossa pesquisa, desde a FCO à análises físico-químicas.

2.1. FARINHA DE CARNE E OSSOS (FCO)

A farinha de carne e ossos (FCO) é produzida a partir de subprodutos não comestíveis de animais — como restos de carne, ossos e gorduras — que passam por cocção, prensagem, secagem e trituração, resultando em um pó fino rico em proteínas de alta qualidade, cálcio, fósforo e lipídeos. Esse processamento reduz a umidade, elimina patógenos e separa a gordura, embora a qualidade final possa variar conforme a matéria-prima.

Amplamente empregada na alimentação de suínos, aves e peixes, e também em fertilizantes orgânicos, sua utilização contribui para a redução de custos na nutrição animal e para o aproveitamento sustentável de resíduos de abatedouros. O Decreto nº 1.225/1962 e normas do Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA) estabelecem padrões de composição, os quais incluem: mínimo de 40% de proteína, máximo de 10% de umidade e gordura, além de requisitos físico-químicos específicos (Tabela 1). Para garantir segurança e eficácia, a produção deve seguir rigorosas condições higiênicas e normas sanitárias, assegurando o papel estratégico da FCO na agroindústria e na gestão ambiental.

Tabela 1 - Especificações químicas para farinhas de carne e ossos

Parâmetros físico-químicos	Especificações
Aspecto	Homogêneo
Umidade	máx. 10%
Proteína bruta	42% a 46%
Acidez	máx. 3,5 % (mg de NaOH/g)
Extrato etéreo	mín. 8%
Material mineral	máx.. 36%
Cálcio	mín. 9%
Fósforo	mín. 4,5 %

Fonte: Adaptado de Bellaver; Zanotto (2004), Machado *et al.* (2021, *apud* Tiritan, 2022) e MAPA (2020).

2.2. ANÁLISE FÍSICO-QUÍMICA DA FCO

A qualidade da FCO depende da conformidade com padrões higiênico-sanitários e tecnológicos, sendo influenciada pela matéria-prima e pelos métodos de processamento (Brasil, 2017 *apud* Tiritan, 2022; Albino; Silva, 1996 *apud* Matias *et al.*, 2012). Fatores como aspecto físico, umidade, extrato etéreo, acidez, índice de saponificação, proteína bruta e elementos minerais determinam a estabilidade, valor nutricional e segurança alimentar do produto.

O aspecto físico envolve cor, textura, odor e homogeneidade, influenciando aceitação e palatabilidade (Butolo, 2002; Fernandes *et al.*, 2016; Souza, 2005). A umidade deve ser controlada para reduzir riscos microbianos, geralmente mantendo-se abaixo de 5–7% (Cecchi, 2003; Chaves *et al.*, 2019; Costa; Romanelli; Trabuco, 2008; Mazutti, Treichel; Luccio, 2010; Butolo, 2002). O extrato etéreo indica a presença de triacilgliceróis e ácidos graxos livres, afetando acidez, rancidez e estabilidade (Bellaver; Zanutto, 2004 apud Tiritan, 2022; Faria Filho *et al.*, 2002; Tucci *et al.*, 2003; Mazutti, Treichel; Luccio, 2010; Butolo, 2002).

O índice de acidez reflete a rancidez hidrolítica e a presença de ácidos graxos livres, impactando digestibilidade e palatabilidade (Bellaver, 2001 apud Giongo, 2017; Cecchi, 2003; Souza, 2022 apud Tiritan, 2022; Araújo, 2015). Já o índice de saponificação avalia a composição lipídica e o peso molecular dos ácidos graxos, influenciando digestibilidade e aproveitamento energético (Firestone, 2013; Araújo, 2015; Souza, 2005; Rebouças, 2013; Rahman *et al.*, 2023; Ivanova *et al.*, 2022).

A proteína bruta (PB) é um indicador da fração proteica, essencial para a nutrição animal, geralmente variando entre 33% e 52% conforme processamento e composição da matéria-prima (Almeida *et al.*, 2013 apud Galeriani; Cosmo, 2020; Moretti, 2022 apud Tiritan, 2022; Souza, 2022 apud Tiritan, 2022; Abimorad *et al.*, 2014 apud Tiritan, 2022; Oliveira *et al.*, 2009; Giongo, 2017; Mihaljev *et al.*, 2015; Hayes, 2020).

Por fim, os elementos minerais - macroelementos como cálcio e fósforo e microelementos como ferro, zinco e selênio - são essenciais à saúde animal e devem ser controlados para manter relações adequadas ($\text{Ca/P} \leq 2,25$) e atender aos limites estabelecidos por normas brasileiras (Pappas, 2006 apud Cosmo, 2020; Bertóli, 2010 apud Cosmo, 2020; Cecchi, 2003; Bellaver; Zanutto, 2004; Machado *et al.*, 2021 apud Tiritan, 2022; Sanches *et al.*, 2006; Souza, 2022 apud Tiritan, 2022; Bellaver; Ludke & Ludke, 2005; Avelar *et al.*, 2009; Instrução Normativa nº 110, 2020).

A literatura aponta ampla variabilidade na composição proteica da FCO, geralmente entre 33% e 52% (Abimorad *et al.*, 2014 apud Tiritan, 2022), embora no mercado a padronização fique entre 42% e 46%, próxima ao farelo de soja. Essa variação decorre da proporção entre carne e ossos, do tipo de processamento e da presença de contaminantes, que influencia também o perfil de aminoácidos. Oliveira e seus colaboradores (2009) registraram teores de 39,13% a 50,89% utilizando o método Kjeldahl, enquanto Giongo (2017), por NIRS, encontrou valores de 45,12% a 53,77%. Estudos comparativos mostram que o NIRS, além de rápido e não destrutivo, apresenta maior precisão, visto que o Kjeldahl pode subestimar os resultados devido à perda de nitrogênio (Mihaljev *et al.*, 2015; Hayes, 2020).

Estudos demonstram ampla variabilidade mineral, por exemplo, Bellaver; Ludke e Ludke (2005), por NIRS, encontraram valores de Ca entre 10,41% e 15,84% e de P entre 5,17% e 7,62%. Dessa forma, Avelar, Ferreira, Brito e Menezes (2009) reforçam a importância desses elementos para a nutrição animal. No Brasil, a

Instrução Normativa nº 110 (2020) define limites, estipulando máximo de 43% para matéria mineral e relação Ca/P inferior a 2,25. O controle desses parâmetros é fundamental para garantir dietas equilibradas, prevenir deficiências nutricionais e assegurar o desempenho produtivo das aves.

3. METODOLOGIA

Os experimentos foram conduzidos no Laboratório de Química de Alimentos do IQ-UFRN.

3.1 ORIGEM DAS AMOSTRAS

As amostras de farinha de carne e ossos (FCO) foram fornecidas pela empresa Indama (Macaíba-RN), especializada na reciclagem de subprodutos animais e vegetais. Para comparação, foi utilizada uma ração comercial pré-forte da marca ADM, com composição básica: umidade $\leq 12,5\%$; proteína bruta $\geq 23\%$; extrato etéreo $\geq 3\%$; material mineral $\leq 10\%$; cálcio $\geq 0,9\%$ e fósforo $\geq 0,6\%$.

3.2 DETERMINAÇÃO DO ASPECTO FÍSICO

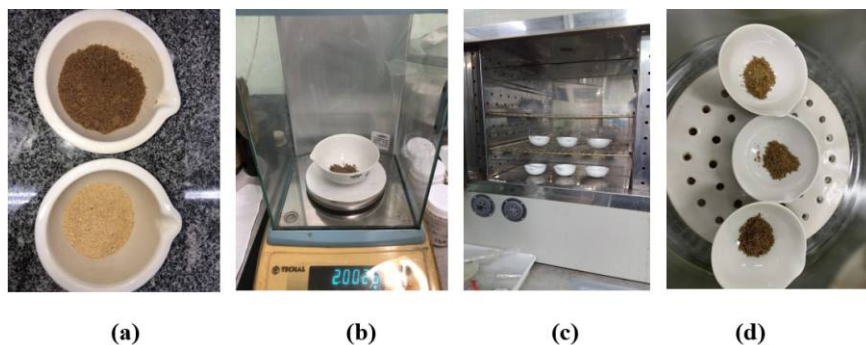
As amostras (FCO1, FCO2 e ração comercial) foram identificadas, pulverizadas manualmente e avaliadas quanto à cor, textura, odor e aparência geral, a fim de detectar irregularidades que pudessem interferir nos resultados das análises subsequentes.

3.3 DETERMINAÇÃO DA UMIDADE

A umidade foi determinada por perda de água em estufa a 105°C , utilizando 2g das amostras em cápsulas de porcelana, aquecidas por 3h e resfriadas em dessecador até peso constante, em triplicata (Cecchi, 2003) (Figura 1).

Figura 1 - Determinação da umidade das amostras:

(a) Preparação das amostras, (b) Pesagem, (c) Secagem em estufa, (d) amostra após secagem.



Fonte: Autores (2024).

3.4 DETERMINAÇÃO DA ACIDEZ

A determinação de acidez foi realizada pelo método titulométrico em triplicata com indicador visual disponível pelo IAL-2008. As etapas do processo podem ser observadas através da Figura 2, que consiste na titulação das amostras com NaOH 0,1 M como titulante e a solução alcoólica de fenolftaleína 1% (m/v) como indicador.

Para a preparação do titulado, pesou-se 2 gramas de amostra em um erlenmeyer e adicionado a ele 60 mL de álcool etílico PA previamente neutralizado com Hidróxido de sódio 0,1 M, que ficaram em repouso durante 30 minutos, com agitação ocasional de 5 a 5 minutos. Logo após, o sobrenadante foi filtrado com papel filtro para outro *erlenmeyer* e adicionou-se 40 mL de álcool etílico PA neutralizado, deixando em repouso.

Após 15 minutos, o sobrenadante é filtrado sobre o mesmo papel filtro juntando ao que já foi filtrado. Titulou-se com solução de Hidróxido de sódio 0,1 N utilizando 4 gotas de Fenolftaleína 1% (m/v) até atingir a coloração rósea persistente por 30 segundos.

Figura 2 - Etapas da titulação para determinação do índice de acidez nas amostras de FCO e RC, na sequência: (1) Descanso da amostra com álcool etílico PA, (2) Filtragem com papel filtro (3) Amostra pós-filtração, (4) Titulação das amostras com solução de NaOH.

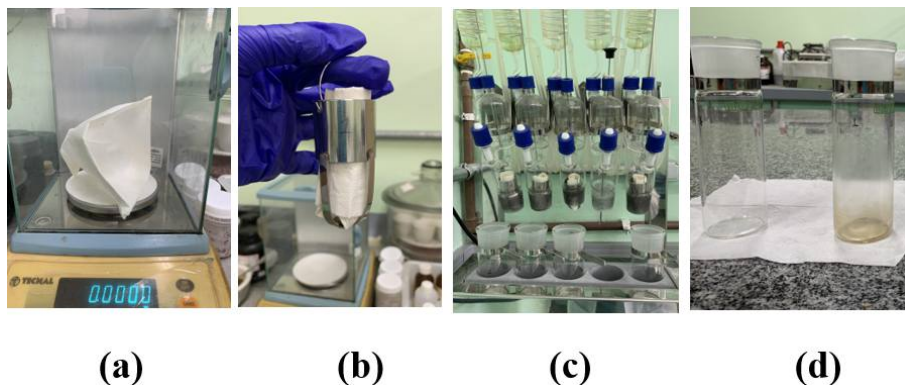


Fonte: Autores (2024).

3.5 DETERMINAÇÃO DO EXTRATO ETÉREO

A determinação do extrato etéreo foi realizada por extração com solvente, utilizando o extração contínua em um aparelho tipo Soxhlet, pelo método *Goldfish*, conforme normas do IAL (2008). As etapas do procedimento e o equipamento utilizado estão ilustrados na figura 3. Para tal, foram pesados 2g de amostra em papel filtro, formando cartuchos que foram acoplados ao aparelho extrator.

Figura 3 - Etapas da determinação do extrato etéreo pelo método Goldfisch: (a) Pesagem da amostra, (b) formação dos cartuchos, (c) Acoplado ao sistema, (d) Resíduo extraído.

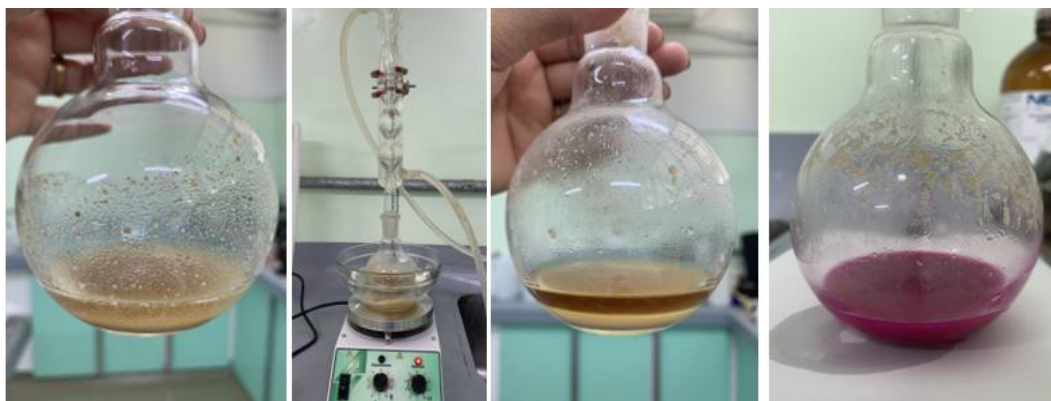


Adicionou-se 100mL de éter dietílico no reboiler e a extração foi mantida por 4 horas. Após a extração, o papel de filtro foi removido e o éter destilado. O resíduo extraído foi seco em estufa a 105°C por aproximadamente 1 hora, resfriado em dessecador até atingir temperatura ambiente e pesado. As etapas do procedimento e o equipamento utilizado estão ilustrados na Figura 3.

3.6 DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE SAPONIFICAÇÃO

Na determinação do índice de saponificação (Figura 4), pesou-se 2 g de amostra em um balão de fundo chato de 250 mL e adicionado a ele 25mL da solução alcoólica de hidróxido de potássio (60% m/v) em álcool etílico. Posteriormente, o balão foi adaptado a um condensador de refluxo e mantido em ebulição branda durante 30 minutos, agitando de vez enquanto a uma temperatura de $\pm 65^{\circ}\text{C}$. Em seguida, 1 mL de fenolftaleína foi adicionado na amostra para titulação a quente com ácido clorídrico 0,5 M até o desaparecimento da coloração rosa.

Figura 4 - (1) Pesagem da amostra, (2) adaptado ao sistema de refluxo, (3) amostra saponificada, (4) amostra titulada.



Fonte: Autores (2024).

3.7 DETERMINAÇÃO DO PERCENTUAL DE PROTEÍNA BRUTA

Para a determinação de proteína pelo método Kjeldahl (Figura 5), pesou-se 0,1g da amostra em papel manteiga e adicionou-se ao microtubo Kjeldahl, juntamente com 2,0 g do catalisador, e, em seguida, foi realizado o processo de digestão com 5mL ácido sulfúrico a uma temperatura de 350 °C no bloco digestor por um período de 3 horas. Em seguida, foi realizado o processo de destilação, adicionou-se à amostra 20 mL de hidróxido de sódio 40% (m/v) e na outra ponta do destilador, um erlenmeyer de 125 mL com ácido bórico 3% (m/v) com 3 gotas de indicador misto. Posteriormente, realizou-se a titulação com ácido clorídrico a 0,1 M.

Figura 5 - Determinação de proteína pelo método Kjeldahl, na sequência: (1) Digestão da amostra com ácido sulfúrico, (2) Destilação, (3) Antes da titulação, (4) Depois da titulação com HCl.



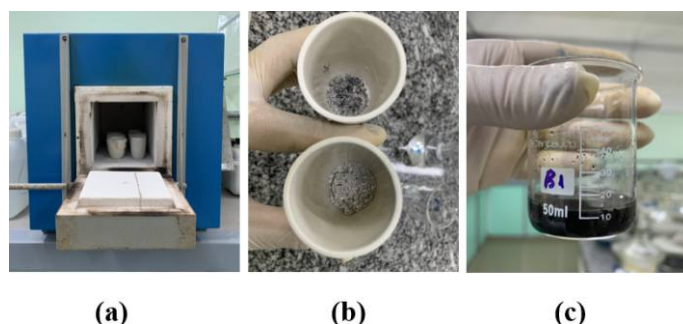
Fonte: Autores (2024).

3.9 DETERMINAÇÃO DOS ELEMENTOS MINERAIS

Na metodologia descrita por EPA 6010C, foi utilizada para a determinação multielementar das concentrações dos metais por espectrometria de emissão atômica com plasma acoplado indutivamente (ICP-OES), com vista axial e radial, detector simultâneo CID (Charge Injection Device).

O procedimento de preparo das amostras (Figura 6) foi por decomposição por via ácida no forno mufla com aquecimento por condução com faixa de aquecimento de 600 °C por 3 horas, e então dissolvida com 5 mL HNO₃ 10 %, seguida de diluição apropriada de 25 mL.

Figura 6 - (a) Amostra na mufla, (b) Amostras calcinadas, (c) amostra digerida com HNO₃ 10%.



Fonte: Autores (2024).

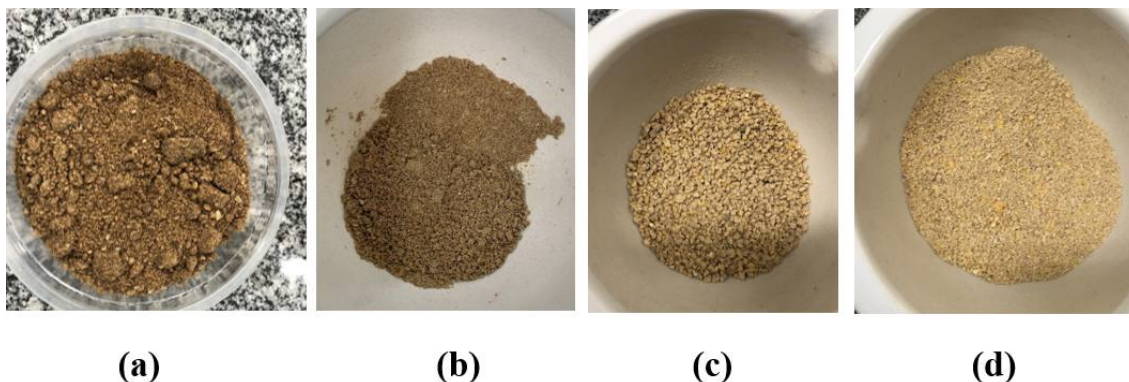
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste tópico, serão discutidos e comparados os resultados obtidos nas amostras de farinha de carne e ossos (FCO) fornecidos pela empresa Indama e a ração comercial (RC). Inicialmente, avaliou-se o aspecto visual das amostras e em seguida, as mesmas foram caracterizadas físico-quimicamente quanto ao teor de proteínas, umidade, índice de acidez, índice de saponificação e extrato etéreo.

4.1 ASPECTO FÍSICO

As amostras de FCO e de RC foram pulverizadas para garantir homogeneidade e, em seguida, avaliadas quanto ao aspecto físico. A FCO (Figura 7(b)) apresentou coloração marrom média, textura fina e uniforme, sem contaminantes visíveis, características que indicam alta qualidade (Souza, 2005). Estudos mostram que a cor pode variar conforme o processamento: o superaquecimento escurece o produto, enquanto tons muito claros sugerem sub-processamento (Butolo, 2002; Fernandes, 2016). Já a RC (Figura 7(d)) apresentou textura granulada, fragmentos de milho e aspecto mais rústico, embora com cheiro típico e boa distribuição de nutrientes. Assim, a FCO destacou-se pela uniformidade e consistência, contrastando com a aparência fragmentada da ração comercial, evidenciando diferenças nos processos produtivos e nos padrões de qualidade.

Figura 7 - Aspecto: (a) FCO inicial, (b) FCO final após a pulverização, (c) RC inicial e (d) RC final após a pulverização.

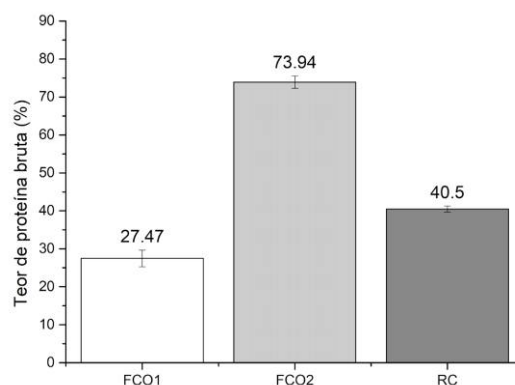


Fonte: Autores (2024).

4.2 TEOR PROTEICO

A análise do teor de proteína bruta revelou grande variabilidade entre as amostras, como pode ser observado na Figura 8. A FCO1 apresentou $27,47\% \pm 2,21\%$, valor abaixo do mínimo estabelecido pela legislação (Brasil, 1994), o que pode estar relacionado ao maior teor de cinzas, umidade e gordura, fatores que reduzem proporcionalmente a fração proteica (Souza, 2022 *apud* Tiritan, 2022).

Figura 8 - Teor em % de proteína bruta das amostras de FCO1, FCO2 e RC



Fonte: Autores (2024).

Em contraste, a FCO2 registrou $73,94\% \pm 4,13\%$, acima do limite esperado, enquanto a ração comercial (RC) apresentou $40,5\% \pm 0,79\%$, em conformidade com sua especificação mínima de 23%. Esses resultados evidenciam a heterogeneidade das farinhas de carne e ossos, decorrente da composição variável da matéria-prima utilizada no processo. O mercado costuma padronizar a farinha de carne e ossos entre 42% e 46% de proteína bruta, aproximando-se dos valores do farelo de soja. Contudo, há grande variabilidade no teor proteico, que pode variar de 33% a 52% (Abimorad *et al.*, 2014 *apud* Tiritan, 2022). Em estudo de Oliveira e seus colaboradores (2009), que analisou dez lotes distintos, os valores encontrados oscilaram entre 39,13% e 50,89%. Essa variação influencia diretamente o valor nutricional da ração, visto que teores mais elevados de proteína estão associados a melhor qualidade e maior digestibilidade, refletindo na eficiência de aproveitamento dos nutrientes pelo organismo.

4.3 MATERIAL MINERAL

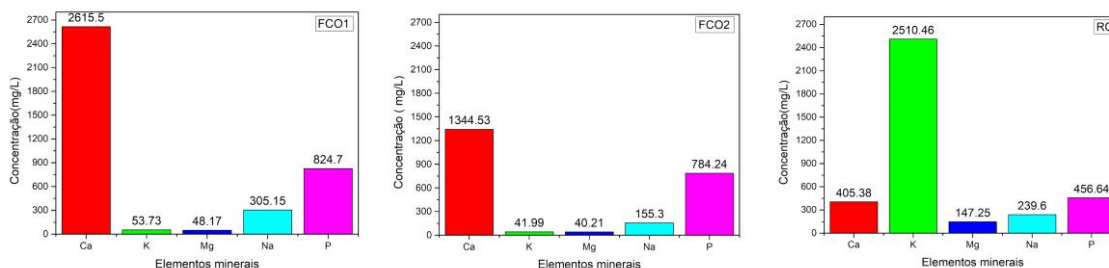
Após a incineração da FCO a $600\text{ }^{\circ}\text{C}$, os elementos inorgânicos remanescentes nas cinzas foram encontrados sob a forma de compostos minerais estáveis, como CaO e fosfatos de cálcio, incluindo hidroxiapatita ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$), além de MgO, K_2O , Na_2O e óxidos de ferro (Fe_2O_3), entre outros em menores proporções. A partir desses resultados, foi possível propor a presença de sais minerais como $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, CaCl_2 , NaCl, MgCl_2 e KCl.

Na análise por ICP-OES, foram identificados macro e microelementos, incluindo Ba, Ca, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, P e Zn, com destaque para os macroelementos Ca, K, Mg, Na e P, que apresentaram maiores concentrações nas amostras. A Figura 9 compara os teores minerais entre dois lotes de FCO e a RC, evidenciando diferenças relevantes na composição mineral.

A análise mineral evidenciou diferenças importantes entre as amostras avaliadas. A FCO1 apresentou alta concentração de cálcio (2615,5 mg/L) em relação ao fósforo (824,7 mg/L), resultando em uma relação Ca/P de 3,17, acima do limite

recomendado de 2,25 (Sanches *et al.*, 2006; Souza, 2022 *apud* Tiritan, 2022), o que sugere possível adição externa de cálcio e risco de adulteração. Já a FCO2, com relação Ca/P de 1,71 (Ca: 1344,53 mg/L; P: 784,24 mg/L), mostrou composição mais compatível com a origem óssea. A ração comercial (RC) apresentou menores concentrações (Ca: 405,38 mg/L; P: 463,64 mg/L) e relação Ca/P de 0,87, refletindo formulação balanceada e controlada.

Figura 9 - Teores dos elementos minerais: (a) FCO1, (b) FCO2, (c) Ração comercial (RC).



Fonte: Autores (2024).

O cálcio e o fósforo são minerais essenciais para aves, pois participam da mineralização óssea, da qualidade da casca dos ovos e do metabolismo energético via ATP, exigindo equilíbrio adequado para garantir absorção eficiente. Além deles, destacam-se o potássio (K) e o magnésio (Mg), ambos fundamentais para o metabolismo, desenvolvimento ósseo e função muscular e nervosa. O K regula o equilíbrio hídrico, a atividade enzimática e o equilíbrio ácido-base, sendo essencial para aves de alta performance (Leeson; Summers, 2008), enquanto o Mg atua como cofator em mais de 300 reações enzimáticas, impactando diretamente a saúde metabólica, produção e qualidade dos ovos (McDowell, 2003).

As análises também mostraram boas concentrações de fósforo nas farinhas (FCO1: 824,7 mg/L; FCO2: 784,24 mg/L), indicando alta biodisponibilidade, enquanto a RC apresentou valores menores, mas suficientes para atender exigências nutricionais. O sódio (Na) variou entre as amostras, sendo maior na FCO1 (305,15 mg/L), intermediário na RC (239,6 mg/L) e menor na FCO2 (155,3 mg/L), refletindo diferenças na composição e potencial nutricional.

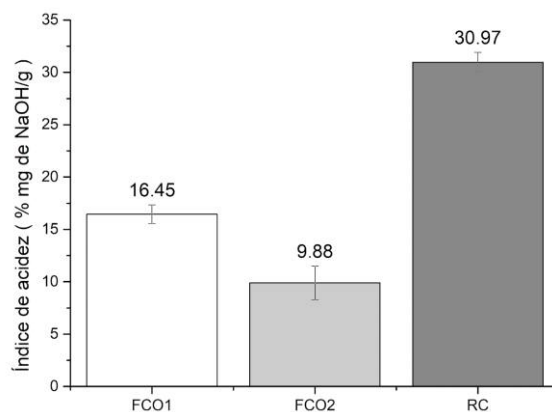
Assim, a FCO1 se destacou pelas altas concentrações minerais, ainda que com indício de adulteração pelo excesso de cálcio, enquanto a FCO2 apresentou perfil mais natural e equilibrado. A RC, por sua vez, manteve composição padronizada e balanceada, adequada para uso em larga escala e capaz de garantir consistência nutricional.

4.4 ACIDEZ

O índice de acidez (IA) é um parâmetro essencial para avaliar a qualidade de matérias-primas para rações, pois reflete a oxidação lipídica, que compromete o valor nutricional e a estabilidade do produto. Na análise realizada, a FCO1

apresentou IA de $16,45 \pm 0,91$ mg NaOH/g e a FCO2 de $9,88 \pm 1,61$ mg NaOH/g, enquanto a ração comercial (RC) apresentou o valor mais alto, $30,97 \pm 0,94$ mg NaOH/g (Figura 10).

Figura 10 - Gráfico do índice de acidez



Fonte: Autores (2024).

Esses dados indicam que a RC sofreu maior degradação lipídica, possivelmente por fatores como tempo de estocagem, calor ou maior quantidade de ácidos graxos livres. Estudos anteriores corroboram esses achados: Oliveira *et al.* (2009) observaram aumento da acidez associado à exposição à luz e calor; Gabbi, Cypriano e Piccinin (2011) notaram que altos índices de acidez degradam ácidos graxos essenciais; e Landin, Cassol, Barbosa e Baldo (2017) indicaram que baixos índices de acidez estão ligados a melhores práticas de produção e armazenamento. Assim, o IA serve como indicador de qualidade, evidenciando que o controle rigoroso na produção e estocagem é necessário para garantir a integridade e o valor nutricional das farinhas e rações.

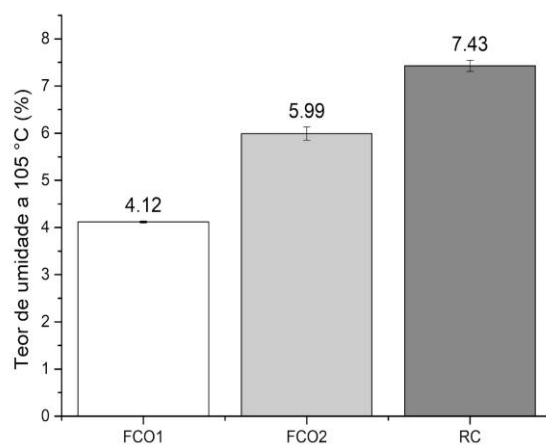
4.5 UMIDADE

A determinação do teor de umidade é essencial para avaliar a qualidade, estabilidade e segurança de alimentos destinados à nutrição animal. Produtos com umidade elevada favorecem o crescimento de microrganismos, como fungos e bactérias, acelerando a deterioração e aumentando o risco de contaminação.

Na análise das amostras, realizada em triplicata em estufa a 105 °C pelo método gravimétrico, observou-se que a FCO1 apresentou o menor teor de umidade com $4,12\% \pm 0,02\%$, indicando maior estabilidade e menor risco microbiano.

A FCO2 apresentou um teor intermediário de $5,99\% \pm 0,14\%$, ainda aceitável, mas exigindo atenção quanto às condições de armazenamento. Já a ração comercial (RC) apresentou o maior teor, de $7,43\% \pm 0,12\%$, o que indica um aumentona instabilidade e a probabilidade de contaminação por microrganismos, especialmente fungos e bactérias produtoras de ácidos graxos livres.

Figura 11 - Gráfico da determinação do teor de umidade a 105 °C



Fonte: Autores (2024).

Estudos anteriores indicam que teores de umidade abaixo de 5% contribuem para maior estabilidade e menor proliferação microbiana, enquanto valores próximos a 8% aumentam a suscetibilidade à contaminação, impactando a qualidade nutricional e a segurança do produto (Chaves *et al.*, 2019; Mazutti, Treichel; Luccio, 2010). Assim, o controle rigoroso da umidade é crucial, sendo recomendado reduzir o teor na RC para melhorar a estabilidade, prolongar a vida útil e garantir uma alimentação mais segura e de qualidade para os animais.

4.6 EXTRATO ETÉREO

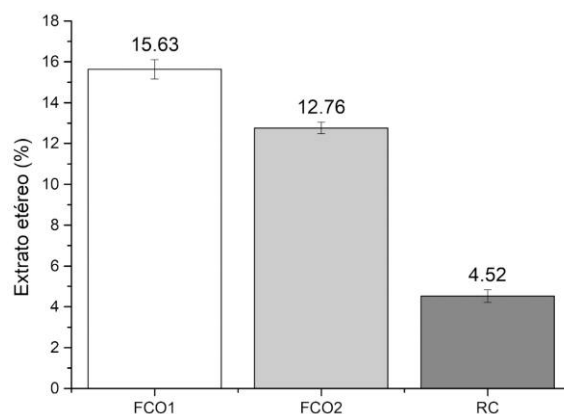
A determinação do teor de gordura, ou extrato etéreo, é fundamental em alimentos destinados à nutrição animal, pois impacta diretamente a densidade calórica, o valor energético e a palatabilidade do produto (Maciel, s.d.). A gordura fornece uma importante fonte de energia, mas níveis excessivos podem comprometer a estabilidade durante o armazenamento, favorecendo a oxidação lipídica e a rancificação, o que prejudica a qualidade nutricional e a segurança alimentar (Ribeiro, 2018). Esse aspecto é especialmente crítico em farinhas de origem animal e rações comerciais, onde a degradação das gorduras pode gerar radicais livres e outros compostos tóxicos, reduzindo a vida útil do produto.

Os resultados apresentados da determinação do extrato etéreo nas amostras FCO1, FCO2 e RC, permitem avaliar comparativamente o teor de gordura e inferir sobre a qualidade nutricional e estabilidade de cada produto.

Na Figura 12, a seguir, observa-se que a amostra FCO1 apresentou o maior teor de gordura, com $15,63\% \pm 0,47\%$, indicando maior densidade calórica, o que pode favorecer o fornecimento energético aos animais. No entanto, esse elevado teor de gordura também aumenta a propensão à oxidação lipídica, exigindo cuidados adicionais no armazenamento para evitar deterioração. A FCO2 apresentou teor intermediário de $12,76\% \pm 0,29\%$, ainda aceitável, mas que requer atenção

especial para prevenir rancificação, principalmente em condições de alta temperatura e umidade.

Figura 12 - Gráfico da determinação de extrato etéreo



Fonte: Autores (2024).

A ração comercial (RC), por outro lado, apresentou o menor teor de gordura, de $4,52\% \pm 0,31\%$, sugerindo menor densidade calórica, porém maior estabilidade do produto, reduzindo significativamente o risco de oxidação lipídica e prolongando sua vida útil. Esse perfil permite que a RC seja armazenada por períodos mais longos com menor necessidade de conservantes.

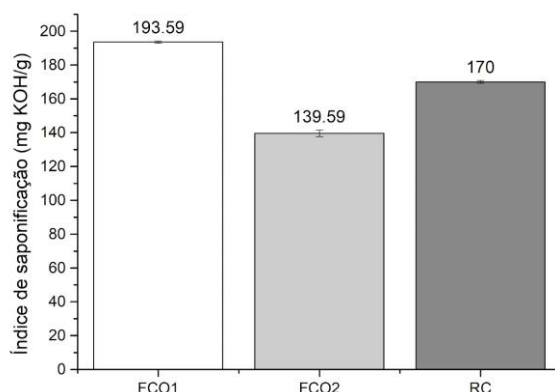
Estudos como os de Ribeiro (2018) e Mazutti, Treichel e Luccio (2010) reforçam que teores elevados de gordura em farinhas de origem animal favorecem a oxidação, comprometendo o valor nutricional e a segurança alimentar; enquanto níveis mais baixos conferem maior estabilidade. Assim, o controle rigoroso do teor de gordura em FCOs e rações comerciais é essencial, podendo ser necessário o uso de antioxidantes ou armazenamento controlado em produtos com maior teor lipídico, como FCO1 e FCO2.

4.7 SAPONIFICAÇÃO

A análise do índice de saponificação é um parâmetro essencial para avaliar a qualidade das gorduras em produtos alimentares, especialmente em farinhas e rações destinadas à nutrição animal. Esse índice indica a quantidade de hidróxido de potássio (KOH), em mg, necessária para saponificar 1 g de gordura, convertendo triglicerídeos em glicerol e ácidos graxos. Ele também fornece informação sobre o tamanho médio das cadeias de ácidos graxos: quanto maior o índice, menores são as cadeias presentes.

O índice de saponificação é relevante nutricionalmente, pois ácidos graxos de cadeia curta ou média são mais facilmente metabolizados, fornecendo energia rápida e eficiente, o que é especialmente importante em FCO, utilizadas para fornecer alta densidade energética. A Figura 13 apresenta os resultados do índice de saponificação para as amostras FCO1, FCO2 e RC.

Figura 13 - Gráfico da determinação do índice de saponificação em mg KOH/g



Fonte: Autores (2024).

Conforme Firestone (2013), o índice de saponificação para óleos e gorduras de origem animal situa-se entre 190 e 200 mg KOH/g, sendo amplamente utilizado como parâmetro de avaliação da conformidade e qualidade das amostras. A FCO1 apresentou o maior índice (193,59 mg KOH/g \pm 0,66), indicando predominância de ácidos graxos de cadeia curta, facilmente metabolizáveis e capazes de fornecer energia rápida, vantagem para dietas de animais em crescimento acelerado, embora aumente a susceptibilidade à oxidação (Araújo, 2015). A FCO2 apresentou o menor índice (139,59 mg KOH/g \pm 1,96), refletindo maior proporção de ácidos graxos de cadeia longa, menos digestíveis e com menor eficiência energética.

A ração comercial (RC) apresentou valor intermediário (170 mg KOH/g \pm 0,85), sugerindo equilíbrio entre cadeias curtas, médias e longas, o que garante digestibilidade adequada e maior estabilidade lipídica, tornando-a adequada para formulações comerciais de uso contínuo.

Assim, a FCO1 se destaca por alta densidade energética e rápida disponibilização de energia, a FCO2 apresenta menor digestibilidade e eficiência energética, enquanto a RC oferece equilíbrio entre digestibilidade e estabilidade lipídica, atendendo de forma consistente às exigências de dietas comerciais.

CONCLUSÃO

A pesquisa evidenciou a importância da análise detalhada dos parâmetros de qualidade da farinha de carne e ossos (FCO) usada em rações animais, apontando variações significativas entre lotes e reforçando a necessidade de padronização. O estudo, realizado com amostras da empresa Indama-RN, avaliou aspectos físico-químicos e nutricionais por meio de análises de cor, textura, odor, umidade, acidez, extrato etéreo, saponificação, proteína bruta e minerais.

Os resultados mostraram discrepâncias no teor proteico: a FCO1 ficou abaixo do mínimo recomendado, enquanto a FCO2 apresentou níveis superiores, oferecendo maior benefício nutricional. A composição mineral indicou potencial para contribuir com o desempenho das aves, desde que monitorada para evitar desequilíbrios. A FCO2 apresentou maior durabilidade devido ao menor índice de acidez, enquanto a FCO1 se destacou pelo baixo teor de umidade e composição lipídica adequada.

De forma geral, a FCO demonstrou-se uma alternativa viável como fonte proteica, apresentando bons níveis de proteína, minerais essenciais e estabilidade, o que contribui para a saúde e produtividade das aves. Além do aspecto nutricional, o uso desse subproduto é relevante do ponto de vista econômico, por reduzir custos em comparação ao farelo de soja, e ambiental, por promover o aproveitamento sustentável de resíduos frigoríficos.

Como perspectivas futuras, sugere-se avaliar a variabilidade entre lotes em diferentes períodos e origens, estudar a influência do tempo de armazenamento, realizar análises complementares (como índice de peróxidos, de iodo e microbiológicas) e investigar antioxidantes naturais, visando aprimorar a qualidade e a durabilidade da FCO.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, J. M. A. *Químicas de Alimentos: Teoria e prática*. 6. ed. [S. l.]: Editora da Universidade Federal de Viçosa (UFV), 2015. 668 p. ISBN 978-8572695206.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RECICLAGEM ANIMAL - ABRA. *Cadeia Produtiva Da Indústria De Rendering No Brasil*. Brasília, 2020. Disponível em: <https://abra.ind.br/abra/wp-content/uploads/2020/07/Estudo-Cadeia-Produtiva.pdf>. Acesso em: 08 abr. 2024.

AVELAR, A. C.; FERREIRA, W. M.; BRITO, W.; MENEZES, M. A. B. C. Composição mineral de fosfatos, calcário e farinha de ossos usados na agropecuária brasileira. *Archivos de Zootecnia*, [s. l.], v. 58, ed. 224, p. 737-740, 2009. <https://doi.org/10.4321/S0004-05922009000400012>.

BELLAVER, C.; LUDKE, J. V.; LUDKE, M. C. M. M. (2005). *Farinha de carne e ossos na alimentação de suínos e aves (Documentos, 153)*. 2005. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/1053034/1/doc153.pdf>. Acesso em: 6 jun. 2024.

BELLAVER, C.; ZANOTTO, D. L. Parâmetros de qualidade em gordura e subprodutos protéicos de origem animal. In: *CONFERÊNCIA APINCO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA AVÍCOLAS*; 2004, Santos - SP. Anais... Campinas: FACTA, v.1, p.79 - 102, 2004.

BRASIL. Decreto nº 1.255, de 29 de junho de 1994. 1994. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/historicos/dcm/dcm1255impressao.htm. Acesso em: 29 out. 2024.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). *Instrução Normativa MAPA nº 8 de 25/03/2004*. 2004. Disponível em: https://www.normasbrasil.com.br/norma/instrucao-normativa-8-2004_75298.html#google_vignette. Acesso em: 6 jun. 2024.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). *Instrução Normativa nº 34, de 28 de maio de 2008*. 2008. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-pecuarios/alimentacao-animal/arquivos-alimentacao-animal/legislacao/instrucao-normativa-no-34-de-28-de-maio-de-2008.pdf>. Acesso em: 29 out. 2024.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). *Instrução Normativa nº 110, de 10 de setembro de 2020*. 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br>. Acesso em: 29 out. 2024.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). *Instrução Normativa nº 110, de 24 de novembro de 2020*. 2020. Disponível em: https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-pecuarios/alimentacao-animal/arquivos-alimentacao-animal/copy2_of_IN1102020LISTADEMATERIASPRIMAS.pdf. Acesso em: 6 jun. 2024.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). *Lista de Matérias-Primas para Alimentação Animal*. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). 2020. Disponível em: < https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-pecuarios/alimentacao-animal/arquivos-alimentacao-animal/copy2_of_IN1102020LISTADEMATERIASPRIMAS.pdf. > Acesso em: 13 dez. 2023.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). Ministério da agricultura pecuária e abastecimento gabinete do ministro instrução normativa no 34, de 28 de maio de 2008. 2008. Disponível em: <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuários/insumos-pecuários/alimentacao-animal/arquivos-alimentacao-animal/legislacao/instrucao-normativa-no-34-de-28-de-maio-de-2008.pdf>>. Acesso em: 26 jun. 2024.

BUTOLO, J. E. Qualidade de ingredientes na alimentação animal. 1. ed. Campinas/SP: CBNA, 430p, 2002.

CALDER, P. C. Functional Roles of Fatty Acids and Their Effects on Human Health. *Journal of Parenteral and Enteral Nutrition*, [s. l.], v. 39, n. 15, p. 18-32, 2015. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26177664/>. Acesso em: 09 jul. 2024.

CALDERANO, A. A.; GENOVA, J. L.; TAVERNARI, F. C.; ALBINO, L. F. T.; ROSTAGNO, H. S. Tabelas brasileiras para aves e suínos - Composição de Alimentos e Exigências Nutricionais. 5. ed. [S. l.]: Editora Scienza, 2024. p. 23-230. ISBN 9788581792064. Disponível em: <https://doi.org/10.26626/978-85-8179-206-4.2024.c001.p.23-230>. Acesso em: 17 abr. 2024.

CECCHI, H. M. Fundamentos teóricos e práticos em análise de alimentos. [s.l.] Editora da Unicamp, 2003. <https://doi.org/10.7476/9788526814721>

CHAVES, L. D. C. S.; ROCHA, A. O.; MELO, W. G. G.; MACÊDO, Y. K.; MURATORI, M. C. S.; SANTOS, J. T. O. Prevalência de contaminação fúngica em rações vendidas a granel na cidade de Teresina-PI. *Pubvet, Londrina*, v. 13, n. 12, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.31533/pubvet.v13n12a461.1-5>. Acesso em: 29 out. 2024.

COSMO, B. M. N.; GALERIANI, T. M. Minerais na alimentação animal. *Revista agronomia brasileira*, [s. l.], v. 4, n. 1, p. 45-60, 2020.

COSTA, D. P. S.; ROMANELLI, P. F.; TRABUCO, E. Aproveitamento de vísceras não comestíveis de aves para elaboração de farinha de carne. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, Campinas/SP, v. 28, n. 3, p. 746-752, 2008.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Resíduos industriais, 2021. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/criacoes/frango-de-corte/pre-producao/fabrica-de-racoes/alimentos/residuos-industriais>>. Acesso em 15 abr. 2024..

EPA. Método 6010C (SW-846): Espectrometria de Emissão Plasma-Atômica Acoplada. 2007. 3. Re. Disponível em : <https://19january2017snapshot.epa.gov/sites/production/files/2015-07/documents/epa->. Acesso em 10 jun. 2024.

FARIA FILHO, D. E.; FARIA, D. E.; JUNQUEIRA, O. M.; RIZZO, M. F.; ARAÚJO, L. F.; ARAÚJO, C. S. S. Avaliação da Farinha de Carne e Ossos na Alimentação de Frangos de Corte. *Revista Brasileira de Ciência Avícola*, [s. l.], v. 4, n. 1, p. 37-45, 2002. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbca/a/ssqWcKPWp77F74cDYPSfWkt/?lang=pt>. Acesso em: 27 set. 2025.

FERNANDES, E. S. Avaliação de fatores que afetam a qualidade de farinha de vísceras na indústria de subprodutos avícolas. 2016. 45 p. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia/GO, 2016. Disponível em: <https://repositorio.bc.ufg.br/tedeserver/api/core/bitstreams/c91df4a3-414b-47f9-a2c1-ce22035118be/content>. Acesso em: 23 set. 2024.

FIRESTONE, D. Physical and Chemical Characteristics of Oils, Fats, and Waxes. 3. ed. [S. l.]: Amer Oil Chemists Society (AOCS), 2012. 303 p. ISBN 978-0983079194.

GABBI, A. M.; CYPRIANO, L.; PICCININ, I. Aspectos microbiológicos e físico-químicos de três rações comerciais sob diferentes condições de armazenamento. *Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal*, [S. l.], v. 12, p. 729-738, 29 out. 2011.

GALERIANI, M. T.; COSMO, M. N. B. Métodos de determinação de extrato etéreo, proteína bruta e fibra em detergente neutro. *Revista Agronomia Brasileira*, v. 4, n. 1, 2020.

GIONGO, A. Parâmetros de qualidade de um subproduto para fabricação de ração animal (farinha de carne e ossos). 2017. 27 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Técnico em Química) - Universidade do Vale do Taquari - UNIVATES, Lajeado, 2017. Disponível em: https://www.univates.br/tecnicos/media/artigos/Artigo_Anelise.pdf. Acesso em: 02 set. 2024.

HAYES, M. Measuring Protein Content in Food: An Overview of Methods. *FOODS*, [s. l.], v. 9, n. 1340, 2020. Disponível em: <https://scispace.com/papers/measuring-protein-content-in-food-an-overview-of-methods-1x2i2wo4g0>. Acesso em: 27 set. 2025. Acesso em: 21 jul. 2024.

IVANOVA, M.; HANGANU, A.; DIMITRIU, R.; TOCIU, M.; IVANOV, G.; STAVARACHE, C.; POPESCU, L.; GHENDOV-MOSANU, A.; STURZA, R.; DELEANU, C.; CHIRA, N. Saponification Value of Fats and Oils as Determined from ¹H-NMR Data: The Case of Dairy Fats. *FOODS*, [s. l.], ano 10, v. 11, n. 1466, 2022. DOI <https://doi.org/10.3390/foods11101466>.

LANDIN, J. P.; CASSOL, M.; BARBOSA, R. G.; BALDO, F. V. Qualidade de farinha de carne e osso suíno: Análise de shelf life de farinha de carne e osso para a produção de ração. 2017. 16 p. Trabalho de Conclusão de Curso - Instituto Federal de Santa Catarina. Disponível em: https://tecnologiaemalimentos.smo.ifsc.edu.br/wp-content/uploads/2017/05/TCC_Jean-Pierre-Landin_Maico-Cassol.pdf. Acesso em: 10 jun. 2024.

LEESON, S.; SUMMERS, J. D. *Commercial Poultry Nutrition*. 3. ed. Guelph, Ontario, Canada: University Books, 2008. ISBN 978-1-904761-78-5.

MACIEL, R. Uso de óleos e gorduras nas rações. Disponível em: http://www.dzo.ufla.br/Roberto/uso_oleos_gorduras.pdf. Acesso em: 02 set. 2024.

MATIAS, C. F. Q.; LARA, L. J. C.; BAIÃO, N. C.; CARDOSO, D. M.; BAIÃO, R. C. Utilização De Farinhas De Origem Animal Na Avicultura. *Revista Eletrônica Nutritime*, [s. l.], v. 9, n. 175, ed. 5, p. 1944-1964, 2012. Disponível em: <<https://nutritime.com.br/wp-content/uploads/2020/02/Artigo-175.pdf>>. Acesso em: 27 mai. 2024.

MAZUTTI, M. A.; TREICHEL, H.; LUCCIO, M. D. Esterilização de farinha de subprodutos animais em esterilizador industrial. *Food Science and Technology*, v. 30, n. 1, p. 48-54, 2010.

MCDOWELL, L. R. *Minerals in Animal and Human Nutrition*. 2. ed. Amsterdam: Elsevier, 2003. ISBN 9780444513670. Disponível em: <<https://shop.elsevier.com/books/minerals-in-animal-and-human-nutrition/mcdowell/978-0-444-51367-0>>. Acesso em: 27 out. 2024.

MIHALJEV, Ž. A.; JAKŠIĆ, S. M.; PRICA, N. B.; ČUPIĆ, Ž. N.; ŽIVKOV-BALOŠ, M. M. Comparison of the Kjeldahl method, dumas method and NIR method for total nitrogen determination in meat and meat products. *Journal of Agroalimentary Processes and Technologies*, v. 21, n. 4, p. 365-370, 2015.

OLIVEIRA, V.; MACHINSKI, T. G.; SILVA, Y. L.; ARAÚJO, J. S.; SCHNEIDERS, J. L. Variabilidade da composição química, física e microbiológica de carne e ossos. *Revista FZVA, Uruguiana*, v. 16, n. 2, p. 173-186, 2009.

PESSÔA, G. B. S.; TAVERNARI, F. C.; VIEIRA, R. A.; TEXEIRA, L. F. Novos conceitos em nutrição de aves. *Rev. Bras. Saúde Prod. Anim.*, Salvador, v. 13, ed. 3, p. 755-774, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1519-99402012000300015>. Acesso em: 17 abr. 2024.

RAHMAN, N.; HASHEM, S.; AKTHER, S.; JOTHI, J. S. Impact of various extraction methods on fatty acid profile, physicochemical properties, and nutritional quality index of Pangus fish oil. Food Science & Nutrition, v. 11, n. 8, p. 4688–4699, 2023. <https://doi.org/10.1002/fsn3.3431>.

REBOUÇAS, A. S. Processos e Equipamentos para Produção de Farinha de Carne, Farinha de Ossos e Colágenos, Esterilizados, Usando a Rota Úmida. 2013. 320 p. Tese (Doutorado em ciências em engenharia industrial.) - UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA, SALVADOR, 2013. Disponível em: https://www.pei.ufba.br/sites/pei.ufba.br/files/reboucas_tese_v20_pos_defesa_final.pdf. Acesso em: 25 mai. 2025.

RIBEIRO, P. M. Oxidação lipídica no processo de extrusão em pet food. 2018. 73 p. Dissertação (Mestre em Zootecnia) - Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2018. Disponível em: <https://ppz.uem.br/trabalhos-de-conclusao/dissertacoes/2018/priscila-m-ribeiro.pdf>. Acesso em: 4 nov. 2024.

ROSTAGNO, H. S.; ALBINO, L. F. T.; DONZELE, J. L.; GOMES, P. C.; OLIVEIRA, R. F.; LOPES, D. C.; FERREIRA, A. S.; BARRETO, S. L. T.; EUCLIDES, R. F. Tabelas Brasileiras Para Aves e Suínos: Composição de Alimentos e Exigências Nutricionais. 4. ed. Viçosa: Departamento de Zootecnia, 2017. 488 p. ISBN 978-85-8179-120-3.

SIMOPOULOS, A. P. The importance of the omega-6/omega-3 fatty acid ratio in cardiovascular disease and other chronic diseases. The Society for Experimental Biology and Medicine, [s. l.], v. 233, n. 6, p. 674-688, 2008. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/18408140/>. Acesso em: 09 jul. 2024.

SOUZA, A. V. C. Farinha de carne e ossos na alimentação de aves e suínos. Poli-nutri, [s. l.], 2005. Disponível em: <https://www.polinutri.com.br/upload/artigo/219.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2024.

TIRITAN, M. G. Farinha de carne e ossos: uma revisão sobre parâmetros de qualidade. Editora Científica Digital, [s. l.], v. 2, p. 202-217, 2022.

TUCCI, F. M., LAURENTIZ, A. C., SANTOS, E. A., RABELLO, C. B., LONGO, F. A., SAKOMURA, N. K. Determinação da composição química e dos valores energéticos de alguns alimentos para aves. Animal Sciences, v. 25, n. 1, p. 85–89, 2003.



CAPÍTULO 10

DOI: 10.63951/synapse978-65-88890-61-5_10

JÔNATAS TEIXEIRA CARNEIRO¹
ARTHUR FERREIRA DE ARAÚJO¹
BRUNO CRUZ DE OLIVEIRA¹
BRISMARCK GÓES DA ROCHA¹

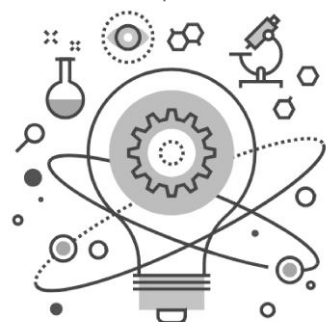
ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DAS CÉLULAS FOTOVOLTAICAS COM RELAÇÃO À TEMPERATURA

Resumo

A temperatura na superfície do módulo fotovoltaico é um dos parâmetros que influenciam o desempenho dos módulos, onde a tensão é inversamente proporcional à temperatura. Assim sendo, é importante realizar investigações que possam conhecer cada vez mais o comportamento térmico do módulo. O estudo analisou um módulo fotovoltaico de silício monocristalino com 36 células, em que foi observada a relação entre a temperatura da superfície das células fotovoltaicas e a direção do painel. A pesquisa foi realizada entre 06/07/2023 e 17/11/2023, com medições diárias de temperatura das células e da moldura do módulo utilizando termômetro infravermelho e câmera termográfica. O painel foi posicionado em quatro direções em relação ao vento (0° , 90° , 180° e 270°) e os dados foram registrados em planilhas, incluindo clima, hora e direção da placa. As análises estatísticas, como regressão linear múltipla e o teste T-Student, mostraram que a temperatura das células varia de acordo com a posição do módulo. O modelo que melhor se ajustou indicou que a temperatura média do módulo fotovoltaico é influenciada principalmente pela temperatura da moldura da placa. Foi adotado um nível de significância de 5% para os testes estatísticos. A pesquisa contribuiu para entender como a orientação do painel fotovoltaico afeta o aquecimento das células em condições normais de operação.

Palavras chave: Módulo fotovoltaico; Célula fotovoltaica; Temperatura do módulo; Direção do módulo fotovoltaico; Eficiência térmica.

¹ Universidade do Estado do Rio Grande do Norte



Abstract

*The temperature on the surface of the photovoltaic module is one of the parameters that influences the performance of the modules, where voltage is inversely proportional to temperature. Therefore, it is important to carry out studies to better understand the thermal behavior of the module. The study analyzed a monocrystalline silicon photovoltaic module with 36 cells, observing the relationship between the surface temperature of the photovoltaic cells and the orientation of the panel. The research was conducted between July 6, 2023, and November 17, 2023, with daily temperature measurements of the cells and the module frame using an infrared thermometer and a thermal imaging camera. The panel was positioned in four directions relative to the wind (0° , 90° , 180° , and 270°), and the data were recorded in spreadsheets, including weather conditions, time, and panel orientation. Statistical analyses, such as multiple linear regression and the Student's *t*-test, showed that the temperature of the cells varies according to the module's position. The model with the best fit indicated that the average temperature of the photovoltaic module is mainly influenced by the frame temperature. A 5% significance level was adopted for the statistical tests. The research contributed to understanding how the orientation of the photovoltaic panel affects the heating of the cells under normal operating conditions.*

Keywords: Photovoltaic module; Photovoltaic cell; Module temperature; Orientation of the photovoltaic module; Thermal efficiency.

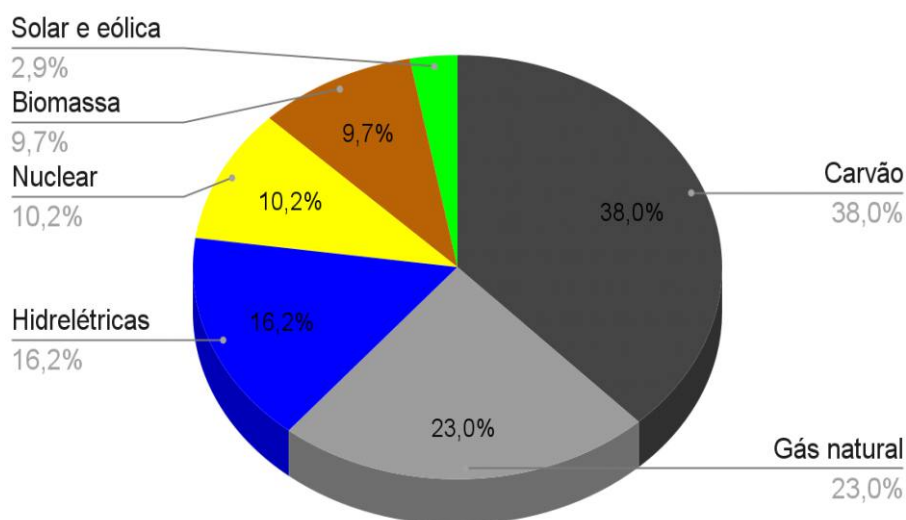
INTRODUÇÃO

Com o aumento da demanda mundial do consumo de energia elétrica e com as mudanças climáticas em virtude do aumento da temperatura no planeta Terra, faz-se necessária a busca por fontes energéticas mais limpas e sustentáveis, tal qual a energia solar fotovoltaica. A demanda total primária de energia no mundo aumentou de 5.536 GTOE em 1971, para 11.235 GTOE em 2007, representando um aumento médio anual de cerca de 2% entre os anos de 1971 a 2007 (Kalogirou, 2016). No ano de 2019 o consumo global de energia foi 174.458 TWh; em 2020 houve uma queda devido à pandemia, representando 168.779 TWh, em 2021 176.847 TWh; em 2022, 179.819 TWh; e, em 2023, 183.230 TWh, ou seja, um aumento médio anual de 1,31% (Sinovoltaics, 2024).

Estima-se que em um ano a Terra recebe 10 mil vezes mais energia solar do que é aproveitada. No entanto, no Brasil, apesar de o país possuir um dos maiores potenciais solares do mundo, com uma média de 4,5 a 6 kWh/m²/dia, a tecnologia fotovoltaica ainda representa uma parcela pequena da matriz energética. Mesmo com os avanços na adoção da energia solar, o Brasil ainda depende majoritariamente de hidrelétricas para a produção de energia elétrica (ANEEL, 2023).

A energia solar é uma fonte de energia renovável que independe de combustíveis fósseis, não emite gases poluentes e nem ruídos sonoros no planeta, sendo assim a fonte de energia mais limpa. Como é possível ver no Gráfico 1, o aproveitamento da energia solar ainda constitui um percentual baixo em relação a outras fontes de energia no mundo.

Gráfico 01: Fontes de energia no mundo em 2022.



Fonte: Agência Internacional de Energia (2022).

A geração de energia elétrica é próxima de 25.721 TWh, sendo 38% delas por carvão, 23% gás natural, 16,2% hidrelétricas, 10,2% nuclear, 9,7% de biomassa, e 2,9% solar e eólica, como mostrado no Gráfico 01 (Agência internacional de energia, 2022). Ou seja, embora a energia solar seja a mais sustentável, é a menos utilizada em relação às outras fontes de energia. A energia solar tem muitas ramificações, desde fonte de energia a seres vivos que realizam fotossíntese, até a conversão de energia solar em energia elétrica através de painéis fotovoltaicos.

No mercado dos painéis fotovoltaicos, os mais utilizados são a base de silício, que subdivide em silício cristalino, mono cristalino e amorfo. Em testes de laboratório, uma placa fotovoltaica de silício monocristalino tem uma eficiência de até 25% (CETEM, 2007 apud Machado, 2015) e um dos parâmetros que afetam a eficiência do módulo fotovoltaico é a temperatura, influenciando a tensão que o módulo fornece em seus terminais e, conseqüentemente, a potência fornecida. A tensão é inversamente proporcional à temperatura, quanto maior a temperatura, menor a tensão, e quanto menor a temperatura, maior a tensão (Villalva, 2016). No que diz respeito à potência, é proporcional a tensão, quanto maior a tensão, maior a potência; e quanto menor a tensão, menor a potência, pois a potência é o produto entre a corrente e a tensão, podendo ser descrita dessa forma na Equação 01, em que P é a potência (em watts, w), V a tensão (em Volts, V) e I a corrente (em Ampere, A).

$$P = V \cdot I \quad (\text{Equação 01})$$

Além disso, tendo em vista que a potência do módulo fotovoltaico é inversamente proporcional à temperatura, altas temperaturas contribuem para a baixa eficiência do módulo fotovoltaico, sendo cada módulo constituído de células fotovoltaicas. Assim, este estudo tem a seguinte questão problema: como as temperaturas da superfície das células fotovoltaicas se comportam?

Esta investigação experimental tem como objeto de estudo um módulo com 36 células de silício monocristalino na Universidade do Estado do Rio Grande do Norte, que consiste em observar se as temperaturas das células fotovoltaicas aquecem de maneira uniforme, uma vez que quanto maior a temperatura da célula, menor a sua eficiência. Portanto, conhecer o comportamento do módulo em relação à temperatura é importante, pois a energia solar fotovoltaica é uma das mais promissoras fontes alternativas para o meio ambiente, por ser considerada uma energia limpa. Alguns dos benefícios ambientais dessa fonte de energia são: redução de emissão dos GEEs (principalmente o CO_2 e NO_x , e emissão de gases tóxicos, particularmente o SO_2); recuperação de áreas degradadas (podendo dar uma utilidade a áreas abandonadas e impróprias para o plantio); exigência reduzida para linhas de transmissão dentro da rede elétrica, pois em momentos de pico contribui para atender a demanda local e proporciona a redução da utilização dos recursos hídricos (Kalogirou, 2016).

Dentre os benefícios socioeconômicos da energia fotovoltaica se destacam: o aumento da independência energética nacional e regional; a criação de oportunidades de empregos; a reestruturação do mercado de energia, devido à inclusão de uma nova tecnologia e o crescimento de novas atividades de produção; a diversificação e segurança de fornecimento de energia; a aceleração da eletrificação de comunidades rurais em áreas isoladas; e a economia de moeda estrangeira (reduz a dependência de combustíveis fósseis importados) (Kalogirou, 2016). Assim, com esse estudo da análise do comportamento de temperatura em cada célula, de modo a observar se comportam de maneira uniforme e qual parâmetro influencia nesse comportamento, acredita-se ser possível controlar esses parâmetros para obter melhor eficiência de energia elétrica. Desse modo, esta pesquisa é importante para aprimorar o rendimento do módulo fotovoltaico.

O estudo experimental teve como objetivo analisar um painel fotovoltaico de silício monocristalino, com 36 células, na qual foi considerada a temperatura das células fotovoltaicas de acordo com parâmetros como hora, clima, direção e a área de aquecimento da superfície de módulos fotovoltaicos, em que os dados coletados foram submetidos a análises estatísticas como: regressão linear, e aplicação dos testes T-Student com nível de significância de 5%. A coleta de dados ocorreu no período de fevereiro a julho de 2023. A inclinação do módulo se manteve a 0° em relação à superfície do solo e a cada dia sua direção era mudada nas coordenadas norte (0°), leste (90°), sul (180°) e oeste (270°), tendo sua temperatura medida com um termômetro infravermelho modelo Mt-350^a Minipa e com uma câmera termográfica modelo A-BF RX-500, além de que a cada 2 dias era realizada a limpeza da superfície do módulo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A energia solar fotovoltaica é uma fonte de energia renovável e limpa, que pode ser utilizada em residências e indústrias e, para entender melhor o princípio de funcionamento da energia fotovoltaica, deve-se compreender de que forma essa energia é utilizável. Há dois sistemas de instalação para a geração de energia elétrica por meio de módulos fotovoltaicos, instalados em sistemas on grid ou off-grid. No sistema on-grid, o módulo fotovoltaico consiste em receber energia luminosa por meio da radiação solar e transformá-la em energia elétrica, gerando corrente que será direcionada ao inversor de corrente contínua para corrente alternada (CC/CA) e, em seguida, levada ao medidor da concessionária, sendo este bilateral, isto é, registra a energia gerada pelos módulos e a energia elétrica utilizada da concessionária (Machado; Miranda, 2015).

Em um sistema off-grid, a obtenção de energia elétrica é o mesmo procedimento de geração da energia elétrica, divergindo do sistema on-grid quanto ao armazenamento. Além disso, no sistema off-grid, o armazenamento se dá por meio

de um banco de baterias, onde a energia é armazenada na forma de corrente contínua, sendo necessário um controlador de cargas. Assim sendo, a energia elétrica pode ser posteriormente utilizada em equipamento de corrente contínua e/ou alternado, sendo para este último necessário um inversor. Porém, o sistema off-grid é ecologicamente insustentável, pois as baterias são feitas de lítio (material tóxico), com tempo de vida útil média de 5 anos e seu descarte de forma sustentável ainda é bem complexo (Machado, 2015).

Já para o sistema de instalação on-grid, não é necessário o uso de banco de baterias, pois a energia elétrica gerada é disponibilizada na rede elétrica de distribuição da concessionária, a qual estaria executando a função de um “banco de baterias” para a utilização da energia durante o horário noturno. No sistema on-grid não é necessário o uso de controlador de carga, porque a corrente elétrica gerada pelos módulos é convertida para corrente contínua por meio de um inversor de corrente, além de manter a mesma frequência da rede elétrica da concessionária, que no Brasil é de 60hz.

2.1 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

A energia solar fotovoltaica é uma fonte de energia renovável e limpa que pode ser utilizada em residências e indústrias e, para entender melhor o princípio de funcionamento da energia fotovoltaica, deve-se compreender de que forma essa energia é utilizável. Há dois sistemas de instalação para a geração de energia elétrica, por meio de módulos fotovoltaicos, instalados em sistemas on grid ou off-grid. No sistema on-grid, o módulo fotovoltaico consiste em receber energia luminosa por meio da radiação solar, e transformá-la em energia elétrica, gerando corrente que será direcionada ao inversor de corrente contínua para corrente alternada (CC/CA); e, em seguida, levada ao medidor da concessionária, sendo bilateral, isto é, registra a energia gerada pelos módulos e a energia elétrica utilizada da concessionária (Machado; Miranda, 2015).

Em um sistema off-grid, a obtenção de energia elétrica se dá pelo mesmo procedimento do sistema on-grid, entretanto, requer banco de baterias para armazenar a energia, pois não é interligado a rede elétrica de energia da concessionária. Contudo, o sistema off-grid é ecologicamente insustentável, pois as baterias são feitas de lítio (material tóxico), com tempo de vida útil média de 5 anos e seu descarte de forma sustentável ainda é bem complexo (Machado, 2015).

2.2 INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA

Quanto a eficiência de um painel fotovoltaico, é notório que ela aumenta conforme a temperatura diminui, influenciando inversamente proporcional a tensão de seus terminais. De acordo com Reiter (2016), a temperatura de um módulo

depende da temperatura ambiente, posição da placa, velocidade do vento, direção do vento e umidade relativa.

Além da temperatura influenciar na eficiência do módulo fotovoltaico, consequentemente influencia na potência (Villalva, 2013). Outra demonstração é observada pelo cálculo da potência máxima na Equação 02, que descreve como a potência diminui à medida que a temperatura aumenta. Esse cálculo tem relevância significativa para este estudo, pois a análise das células do módulo fotovoltaico tomou como base a temperatura (Kalogirou, 2016).

$$P_{max} = \frac{eV_{max}^2}{kT_c + eV_{max}} (I_{sc} + I_0) \quad (\text{Equação 02}).$$

Na Equação 02, é a constante de Boltzman, T_c a temperatura em Celsius ($^{\circ}\text{C}$), V_{max} é a tensão máxima, I_{sc} é a corrente de curto-circuito e I_0 a corrente de saturação reversa, que é a corrente que circula através de um diodo ou junção p-n mesmo quando está polarizado reversamente e depende fortemente da temperatura.

3 METODOLOGIA

Nesta seção, serão apresentados os métodos adotados para investigar o comportamento das células fotovoltaicas com relação à temperatura. O estudo de caso foi conduzido com experimentos práticos de medição de temperatura, posição do módulo e direção do vento. A metodologia inclui o ambiente experimental, os instrumentos utilizados e os critérios de análise dos dados.

O experimento iniciou-se, na data 06/07/2023, às 08:21, na Universidade do Estado do Rio Grande do Norte (UERN), com o objeto de estudo: módulo fotovoltaico à base de silício monocristalino de 36 células fotovoltaicas de 150W, apresentado na Fotografia 01. O módulo fotovoltaico foi exposto em um local aberto, sem sombras, com muita luminosidade solar e ventilação, sobre uma mesa com cabos de madeira sustentando a placa e isolando-o do contato da superfície da mesa.

No painel, foi medida a temperatura de cada célula com um termômetro infravermelho da marca Minipa, com capacidade para medir entre -50°C a 420°C , e a área de aquecimento da superfície do módulo registrada por meio de uma câmera termográfica A-BF RX-500 exibido. Em seguida, a temperatura do módulo fotovoltaico foi medida com uma câmera termográfica A-BF RX-500, a câmera oferece uma análise detalhada da variação de temperatura em toda área da superfície do módulo fotovoltaico, as quais as temperaturas mais elevadas são destacadas com cores mais quentes (do amarelo ao vermelho), ao mesmo tempo, informando a temperatura de cada foco de calor; enquanto as temperaturas menos elevadas são destacadas com cores azul e verde.

O módulo exposto à radiação solar colocada sobre uma mesa e com dois cabos de madeira na superfície inferior visou evitar o contato com a mesa, que foi fabricada com aço inox.

O experimento foi realizado exclusivamente nos dias úteis, durante o período de 27/09/2023 a 06/07/2023, com medições de temperatura das células fotovoltaicas e da moldura do módulo feitas duas vezes ao dia, na faixa horária de 8h50m às 13h00min, pois segundo o Atlas Brasileiro de Energia Solar, os horários de pico de radiação solar são entre 10h e 14h. Para cada registro das temperaturas do experimento, foi utilizada uma tabela (ver Tabela 02), na qual foram anotadas as temperaturas obtidas de cada célula e da moldura do módulo. Além disso, foram registradas as condições do tempo, a data, o horário e a direção do vento. As denominações de suas células e molduras para a análise são representadas pelo croqui na Figura 01, isto é, uma matriz de ordem 4 x 9. O módulo foi rotacionado no sentido horário para que cada lado pudesse receber a corrente de vento.

“C” representa a coluna e “L” representa a linha, enquanto M1, M2, M3 e M4 são as molduras do módulo fotovoltaico. A direção da placa foi alterada para as posições conforme a direção da bússola nos sentidos norte (0°), leste (90°), sul (180°) e oeste (270°).

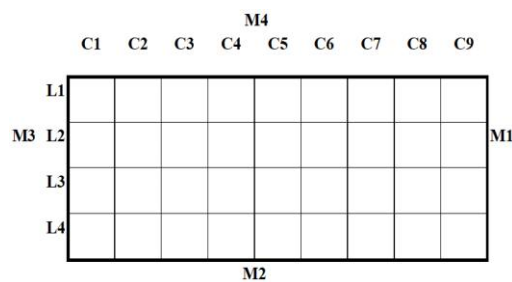
Para a análise dos dados, foram utilizadas as técnicas estatísticas como: regressão linear múltipla e teste T-Student ao nível de significância de 5%. Esse teste contribui na aceitação ou rejeição da hipótese nula (H_0), isto é, não há diferença significativa nas temperaturas nas comparações entre as linhas e entre as colunas. Quando o resultado do teste (p-valor) for menor ou igual a 5% conclui-se rejeitar a hipótese nula. Foi utilizada a Regressão Linear Múltipla a fim de identificar um modelo linear que possa estimar a média da temperatura do módulo com base nas temperaturas dos lados da moldura, isto é, não ser necessário mensurar cada celular do módulo para posteriormente calcular a média. Com a regressão linear é possível identificar a correlação existente entre a variável temperatura dos lados da moldura e a temperatura média do módulo. Já o teste T-Student foi utilizado para comparar as temperaturas das linhas e colunas.

Fotografia 01 - Módulo fotovoltaico de silício monocristalino



Fonte: Autores (2024).

Figura 01 - Croqui do módulo fotovoltaico

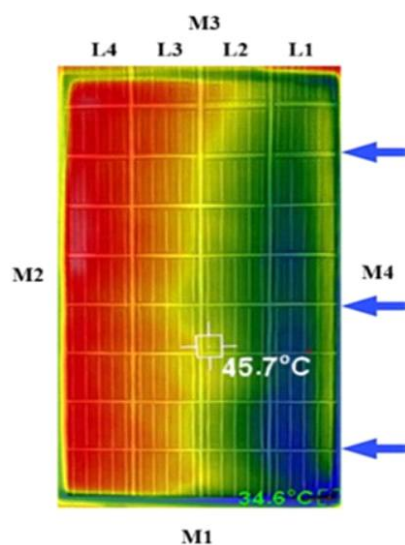


Fonte: Autores (2024)

As imagens 01 a 04 referem-se às áreas de aquecimento do módulo fotovoltaicos nas direções Norte, Sul, Leste e Oeste, sendo as setas na cor azul indicadoras do sentido do vento. É possível observar nas imagens que as células não aquecem uniformemente, isto é, a posição onde a corrente de vento “bate” no módulo apresenta temperatura menor (cor azul) na superfície em relação às demais áreas com maior temperatura (vermelho e amarelo).

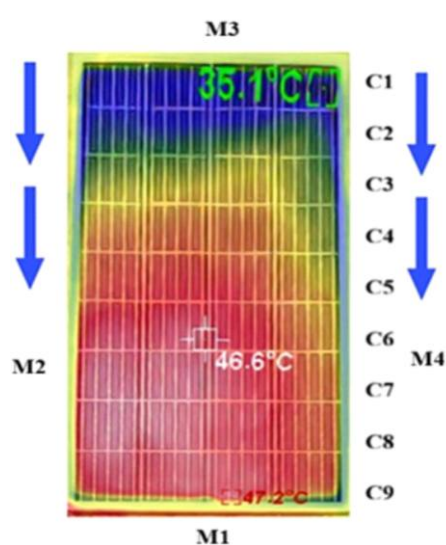
Ao observar as imagens abaixo é perceptível que as linhas e colunas que tiveram contato inicial com o vento apresentam temperaturas menores (cores azul e verde). Comparando todas as linhas entre si, foi observado pelo teste T-Student que para a Imagem 01 (Direção 0°) não há diferença significativa na temperatura entre as linhas L1 x L2 ($p \leq 0,075$) enquanto as demais linhas, tanto para a Imagem 01 como para Imagem 03, apresentaram diferenças significativas ($p \leq 0,000$). Já a análise das temperaturas das células das colunas referente a Imagens 02, é observado que não há diferença significativa entre as colunas C1 x C2 ($p \leq 0,075$), C8 x C9 ($p \leq 0,074$) e C3 x C4 ($p \leq 0,05008$), as demais combinações das colunas da imagem 02 são estatisticamente significativas ($p \leq 0,000$), enquanto que na Imagem 04 não há diferença entre C3 x C7 ($p \leq 0,094$), C3 x C8 ($p \leq 0,262$), C3 x C9 ($p \leq 0,150$), C4 x C5 ($p \leq 0,715$), C4 x C6 ($p \leq 0,158$), C4 x C7 ($p \leq 0,250$), C4 x C8 ($p \leq 0,132$), C5 x C6 ($p \leq 0,052$), C5 x C7 ($p \leq 0,255$), C5 x C9 ($p \leq 0,133$), C6 x C7 ($p \leq 0,365$), C7 x C8 ($p \leq 0,138$), C7 x C9 ($p \leq 0,170$) e por ultimo C8 x C9 ($p \leq 0,219$). Nas demais comparações das colunas da Imagem 04, as temperaturas são diferentes, pois $p \leq 0,050$. As linhas das Imagens 02 e 04 não foram comparadas, pois não são necessárias devido à direção do vento, assim como as colunas das Imagens 01 e 03.

Imagem 01 – Direção do módulo 0°



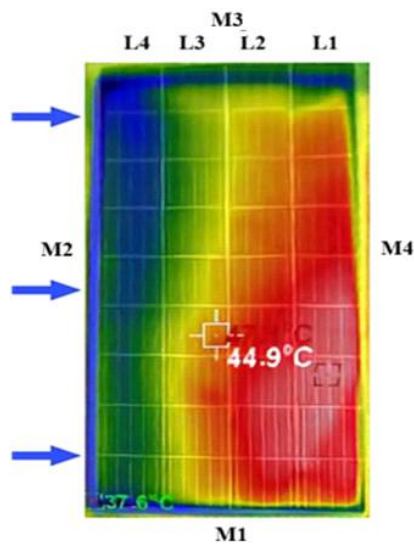
Fonte: Autores (2024)

Imagem 02 – Direção do módulo 90°



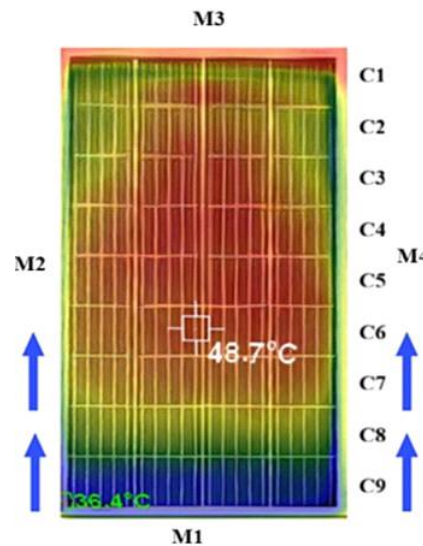
Fonte: Autores (2024)

Imagem 03 – Direção do módulo 180°



Fonte: Autores (2024)

Imagem 04 – Direção do módulo 270°



Fonte: Autores (2024)

Com o objetivo de encontrar um modelo que possa estimar a temperatura média do módulo fotovoltaico sem ter que mensurar a temperatura de cada célula para posteriormente calcular média, foi aplicado a técnica de regressão linear múltipla com os resultados obtidos presentes no Quadro 01.

Analisando o Quadro 01, observa-se que não é necessário mensurar a temperatura das trinta e seis células para calcular a temperatura média do módulo, mas é possível obter a estimativa, basta mensurar a temperatura de cada lado da moldura (M1, M2, M3 e M4) e substituir em um dos modelos abaixo, pois todos apresentam poder explicativo do modelo (modelo (R^2) superior a 0,9. O modelo mais eficiente encontrado corresponde ao *TMED0°*, isto é, Temperatura Média na Direção 0°, uma vez que apresenta maior poder explicativo (0,995), significando que as temperaturas das molduras explicam em 99,50% de toda variação da média de temperatura do módulo e apenas 0,5% são atribuídos a fatores desconhecidos.

Quadro 01- Modelos que estimam a temperatura média do módulo fotovoltaico

Modelo	R^2	Dados	Direção
$TMED0^\circ = -16,2223 + 1,8653M_1 - 0,3786M_2 + 0,0999M_3 + 0,0633M_4$	0,995	81	0°
$TMED90^\circ = -19,6224 + 0,4030M_1 + 0,4030M_2 + 0,099M_3 + 0,2205M_4$	0,940	40	90°
$TMED180^\circ = 7,6021 + 0,3572M_1 - 0,30854M_2 - 1,1030M_3 + 1,8856M_4$	0,953	90	180°
$TMED270^\circ = 10,3792 - 0,6817M_1 - 0,4644M_2 + 0,3244M_3 + 1,5351M_4$	0,970	90	270°

Fonte: Autores (2024).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo teve como objetivo principal estimar a temperatura média do módulo fotovoltaico em função das variáveis temperatura da moldura e direção do vento. Para isso, foi realizado um estudo do tipo experimental, onde as temperaturas dos lados da moldura foram mensuradas estando o módulo fotovoltaico com inclinação 0° e nas direções Norte, Leste, Sul e Oeste.

Com base na análise dos dados coletados, conclui-se que diante dos modelos lineares encontrados, quando considerado a temperatura média do módulo fotovoltaico, o melhor modelo corresponde ao modelo da Temperatura Média na Direção 0° $TMED0^\circ = -16,2223 + 1,8653M_1 - 0,3786M_2 + 0,0999M_3 + 0,0633M_4$, por apresentar melhor poder explicativo do modelo (0,995). Assim, em qualquer direção em que esteja o módulo fotovoltaico, utilizando a temperatura dos lados da moldura, é possível obter uma boa estimativa, pois os poderes explicativos dos modelos encontrados são superiores ou iguais a 0,94.

Apesar dos módulos fotovoltaicos terem sido fabricados para estarem expostos ao sol, é conclusivo que as células do módulo não aquecem uniformemente, pois o aquecimento depende do lado do módulo onde a corrente de ar bate, pois neste ponto tanto a moldura como a célula tende a ter menor temperatura em relação ao lado oposto.

REFERÊNCIAS

KALOGIROU, Soteris A. Engenharia de energia solar: processos e sistemas. São Paulo: GEN LTC, 2016.

LIBRARY, A. R. P. Polycrystalline silicon solar cell - Stock Image - C019/6152. Disponível em: <https://www.sciencephoto.com/media/571070/view/polycrystalline-silicon-solar-cell>. Acesso em: 1 jul. de 2024.

MACHADO, C. T.; MIRANDA, F. S. Energia Solar Fotovoltaica: Uma Breve Revisão. Revista Virtual de Química, v. 7, n. 1, p. 126–143, 2015.

MUSEUM OF SOLAR ENERGY. Silicon Ingot. 2024. Disponível em: <https://solarmuseum.org/cells/silicon-ingot/>. Acesso em: 11 set. de 2024.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S.; LIMA, F. L.; RÜTHER, R.; ABREU, S. L.; TIEPOLO, G. M.; PEREIRA, S. V.; SOUZA, J. G. Atlas brasileiro de energia solar. 2.ed. São José dos Campos: INPE, 2017. 80p. Disponível em: <http://doi.org/10.34024/978851700089>. Acesso em: 16 set. de 2024.

PLANAS. O que é silício policristalino?. Energia solar, 2019. Disponível em: <https://pt.solar-energia.net/energia-solar-fotovoltaica/elementos/painel-fotovoltaico/celula-fotovoltaica/silicio/silicio-policristalino>. Acesso em: 11 set de 2024.

POWER FILM SOLAR. Thin-Film Solar Technology. 2023. Disponível em: <https://www.powerfilmsolar.com/technology/thin-film>. Acesso em: 1 jul. de 2024.

RITCHIE, H.; ROSER, M.; ROSADO, P. Energy Production and Consumption. Our World in Data, 2020. Disponível em: <https://ourworldindata.org/energy-production-consumption>. <https://sinovoltaics.com/learning-center/solar-cells/monocrystalline-silicon-cells/>. Acesso em: 1 jul. de 2024.

RITCHIE, H.; ROSER, M.; ROSADO, P. Energy Production and Consumption. Our World in Data, 2020. Disponível em: <https://ourworldindata.org/energy-production-consumption>

TAMIZHMANI, G. et al. PHOTOVOLTAIC MODULE THERMAL/WIND PERFORMANCE: Long-Term Monitoring and Model Development For Energy Rating. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://www.nrel.gov/docs/fy03osti/35645.pdf>. Acesso em: 11 set de 2025.

VILLALVA. Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações. Barueri: Editora Érica, 2012.



CAPÍTULO 11

DOI: 10.63951/synapse978-65-88890-61-5_11

RAVENA YASKARA SAMPAIO DE OLIVEIRA TAVARES¹
LEONARDO LINHARES OLIVEIRA¹

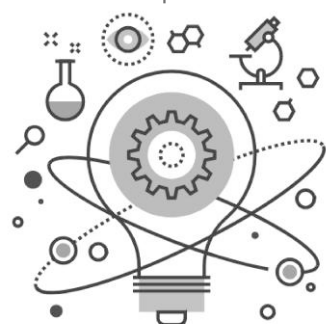
ANÁLISE DOS CAMPOS MAGNÉTICOS GERADOS POR NANOELEMENTOS COM GEOMETRIA CILÍNDRICA

Resumo

O estudo das propriedades magnéticas dos materiais aplicados em diversos dispositivos tecnológicos é de relevante interesse tanto para a indústria como para a ciência. O desenvolvimento de novas aplicações e o aprimoramento daquelas já existentes motivam os estudos de descrição do comportamento magnético de nanoelementos utilizados no desenvolvimento desses dispositivos. Uma característica de interesse em aplicações é o perfil do campo magnético produzido por tais nanopartículas, levando em consideração as dimensões geométricas da nanoestrutura e ainda os parâmetros magnéticos dos constituintes. Diante disso, no presente trabalho, foi feita a descrição teórica do perfil do campo magnético produzido por nanoestruturas magnéticas com diferentes geometrias constituídas de Fe₃O₄, SmCo₅ e Nd₂Fe₁₄B. A descrição contou com a utilização de um algoritmo numérico, que se baseou no método de campo efetivo local autoconsistente, o que permitiu a análise das propriedades de interesse, como o perfil do campo e da magnetização. Os perfis dos campos magnéticos e das curvas de magnetização foram sintetizados em gráficos e foi observada uma maior uniformidade da magnetização nas nanoestruturas que apresentaram determinadas características. Tais características estão relacionadas com as dimensões geométricas de cada estrutura, bem como com parâmetros inerentes à composição do material. Uma das relações mais claramente observadas foi a influência da magnetização de saturação do material nos resultados obtidos. Durante as análises se pôde perceber que materiais com altos valores de magnetização de saturação respondiam de maneira mais intensa às variações dimensionais no que se refere à uniformidade de magnetização da estrutura após a aplicação de um campo externo.

Palavras-chave: Nanomagnetismo; Campo magnético; Fe₃O₄; SmCo₅; Nd₂Fe₁₄B.

¹ Universidade do Estado do Rio Grande do Norte



Abstract

The study of the magnetic properties of materials applied in various technological devices is of relevant interest for both industry and science. The development of new applications and the improvement of existing ones motivate studies to describe the magnetic behavior of nanoelements used in the development of these devices. A characteristic of interest in applications is the profile of the magnetic field produced by such nanoparticles, taking into account the geometric dimensions of the nanostructure and also the magnetic parameters of the constituents. Therefore, in the present work, the theoretical description of the profile of the magnetic field produced by magnetic nanostructures with different geometries consisting Fe_3O_4 , SmCo_5 and $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ was made. The description relied on the use of a numerical algorithm, which was based on the self-consistent local effective field method, which allowed the analysis of the properties of interest, such as the field profile and magnetization profile. The profiles of magnetic fields and magnetization curves were synthesized in graphs and a greater uniformity of magnetization was observed in the nanostructures that presented certain characteristics. Such characteristics are related to the geometric dimensions of each structure, as well as inherent parameters of material composition. One of the most clearly observed relationships was the influence of the material's saturation magnetization on the results obtained. During the analyses, it could be seen that materials with high saturation magnetization values responded more intensely to dimensional variations with regard to the magnetization uniformity of the structure after the application of an external field.

Keywords: *Nanomagnetism; Rare-earth elements; Bimagnetic nanoparticles.*

INTRODUÇÃO

O estudo e a aplicação de materiais com propriedades magnéticas têm uma longa trajetória histórica, iniciando-se com a bússola nos séculos XV e XVI, um instrumento fundamental para as grandes navegações (Pessoa, 2017). A evolução tecnológica permitiu o desenvolvimento de ímãs permanentes, essenciais em dispositivos como motores e alto-falantes, e, mais recentemente, o avanço do nanomagnetismo — o estudo de propriedades magnéticas em escala nanométrica — que revolucionou as tecnologias de gravação de dados (Pessoa, 2017).

As propriedades magnéticas das substâncias originam-se de uma característica quântica intrínseca dos elétrons, o spin, que gera um momento magnético. Em certos elementos, como os do grupo de transição do ferro (níquel, manganês, ferro, cobalto) e terras raras, o spin total não é nulo, resultando em um momento magnético permanente (Rezende, 2002). O aprofundamento no conhecimento dessas características, aliado à nanotecnologia, que trabalha com elementos em escalas de 10^{-9} m, possibilita o desenvolvimento de materiais mais precisos para aplicações específicas e inovadoras (Agra; Queiroz Júnior; Queiroz, 2018).

O estudo de nanoelementos magnéticos tem gerado contribuições significativas para setores como a tecnologia da informação, com os modernos mecanismos de gravação em disco, e a área da saúde, em técnicas como a vetorização magnética de fármacos (Oliveira, 2016). Um desenvolvimento notável foi o das memórias magnetorresistivas de acesso aleatório (MRAMs), baseadas no efeito da magnetorresistência gigante. Diferentemente das memórias anteriores (SRAMs e DRAMs), as MRAMs não são voláteis, pois armazenam dados através do momento magnético de nanoelementos, sem a necessidade de fornecimento contínuo de energia (PESSOA, 2017). Um marco recente foi o desenvolvimento de uma STT-MRAM de 128Mb com altíssima velocidade de gravação e baixo consumo de energia, abrindo portas para a produção em massa e aplicação em inteligência artificial e Internet das Coisas (IoT) (Sato *et al.*, 2018).

Nesse contexto, o estudo das propriedades magnéticas de materiais é de grande interesse científico e industrial. Este trabalho se propõe a fazer a descrição teórica do perfil do campo magnético produzido por nanoestruturas de Ferro (Fe) e SmCo_5 com diferentes geometrias. A pesquisa, de caráter explicativo e experimental (Gil, 2002), utilizará um algoritmo numérico baseado no método de campo efetivo local autoconsistente para analisar as propriedades de interesse. Embora não envolva experimentação laboratorial direta, o estudo se enquadra como experimental por manipular variáveis do objeto de estudo em um ambiente controlado (GIL, 2002).

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A descrição de sistemas magnéticos em escala nanométrica é provida pela teoria micromagnética. Este modelo estabelece a transição entre a fenomenologia do eletromagnetismo clássico e a natureza quântica da matéria, postulando que a configuração de equilíbrio de um sistema, para um dado campo magnético externo (H), resulta do balanço energético entre múltiplas interações (Oliveira, 2016). As principais contribuições energéticas consideradas são: a energia de troca, de origem quântica, que favorece o paralelismo entre momentos magnéticos vizinhos; a energia Zeeman, que descreve a interação do sistema com o campo magnético aplicado; a energia de anisotropia magnetocristalina, que estabelece eixos de fácil magnetização na estrutura do material; e a energia magnetostática, que representa as interações de longo alcance entre todos os momentos magnéticos constituintes do sistema (Pessoa, 2017).

Face à complexidade computacional inerente ao tratamento das interações em nível atômico, a implementação numérica do modelo micromagnético adota a discretização do meio contínuo em um conjunto de células de simulação. Cada célula representa um volume que engloba um número significativo de átomos, cujo momento magnético resultante é tratado como uma entidade única. A dimensão de cada célula é criteriosamente limitada pelo comprimento de troca do material, assegurando que as variações da magnetização em seu interior sejam desprezíveis, comportando-se, assim, como um monodomínio magnético (Pessoa, 2017).

A determinação da configuração magnética do sistema é realizada por meio de um procedimento iterativo, o método de campo efetivo local autoconsistente. O campo efetivo (H_{eff}), que atua sobre cada célula, é derivado da energia total do sistema. A densidade de energia magnética total é dada por:

$$E = \frac{A}{d^2} \sum_j \sum_k (1 - \hat{m}_j \cdot \hat{m}_k) - M_S \vec{H} \cdot \sum_j \hat{m}_j - K \sum_j (\hat{m}_j^i)^2 \quad (1)$$
$$+ \frac{M_S}{2} \sum_j \sum_k \left(\frac{\hat{m}_j \cdot \hat{m}_k}{n_{jk}^3} - \frac{3(\hat{m}_j \cdot \hat{n}_{jk})(\hat{m}_k \cdot \hat{n}_{jk})}{n_{jk}^5} \right)$$

Onde o primeiro termo representa a energia de troca, sendo A a constante de rigidez de troca. O versor de magnetização local é $\hat{m}_j = \frac{\vec{M}_j}{M_S}$ ($j = 1, \dots, N$), com $|\hat{m}_j| = 1$; aqui \vec{m}_j é a magnetização média na célula j e M_S a magnetização de saturação do material. O segundo termo corresponde à energia de Zeeman associada ao campo externo aplicado H . O terceiro termo descreve a energia de anisotropia cristalina uniaxial, com constante K (e eixo fácil \hat{i}). Por fim, o quarto termo está associado à energia de interação dipolar, na qual $n_{jk} = |\vec{r}_j - \vec{r}_k|/d$ é a distância adimensional entre as células j e k , expressa em unidades do tamanho de célula de simulação d . A configuração de equilíbrio é encontrada usando um algoritmo autoconsciente, onde a

magnetização \vec{m}_j é ajustada para ser paralela ao campo magnético local $\left[H_{eff}^j = - \left(\frac{1}{M_S} \right) \left(\frac{\partial E}{\partial \vec{m}_j} \right) \right]$ de modo que, dentro de uma precisão numérica razoável, $(\vec{m}_j \times H_{eff}^j = 0)$. A convergência é verificada para garantir um torque máximo de $10^{-25} J$. Na descrição numérica dos materiais magnéticos do presente trabalho foram utilizados os parâmetros magnéticos listados na Tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros magnéticos intrínsecos dos materiais utilizados.

Material	Ms(kOe)	A(10^{12} J/m)	Ku(10^6 J/m)
Fe ₃ O ₄	0,49	13,2	0,01
SmCo ₅	0,85	22	17
Nd ₂ Fe ₁₄ B	1,28	7,7	5

Fonte: Jimenez-Villacorta, 2014

3. METODOLOGIA

A presente pesquisa foi conduzida em duas etapas complementares, bibliográfica e experimental. Na primeira etapa, realizou-se uma pesquisa bibliográfica, com base em obras e artigos científicos que tratam do nanomagnetismo, das nanopartículas e dos materiais ferromagnéticos. Essa investigação possibilitou reunir conceitos já consolidados, analisar diferentes teorias e avaliar suas contribuições para o entendimento da problemática abordada. Segundo Koche (2006), a pesquisa bibliográfica busca explicar um problema a partir do conhecimento disponível em teorias já publicadas, levantando e analisando contribuições relevantes ao tema. Dessa forma, a revisão de literatura foi fundamental para embasar teoricamente o estudo, direcionando as escolhas metodológicas e experimentais.

A segunda etapa corresponde à pesquisa experimental, na qual foram realizadas simulações computacionais. Conforme Bastos (1991), a pesquisa experimental consiste em refazer condições de um fenômeno para observá-lo sob controle, utilizando instrumentos de precisão que permitam estudar suas causas e efeitos. Nesse contexto, adotou-se a teoria micromagnética para descrever os sistemas magnéticos estudados, aplicando-se o conceito de célula de simulação em geometria cilíndrica. Essa abordagem possibilitou investigar o comportamento das fases magnéticas de equilíbrio em nanopartículas com simetria cilíndrica. Foram analisados o comportamento da magnetização, bem como o perfil do campo magnético considerando diferentes parâmetros geométricos, bem como materiais distintos.

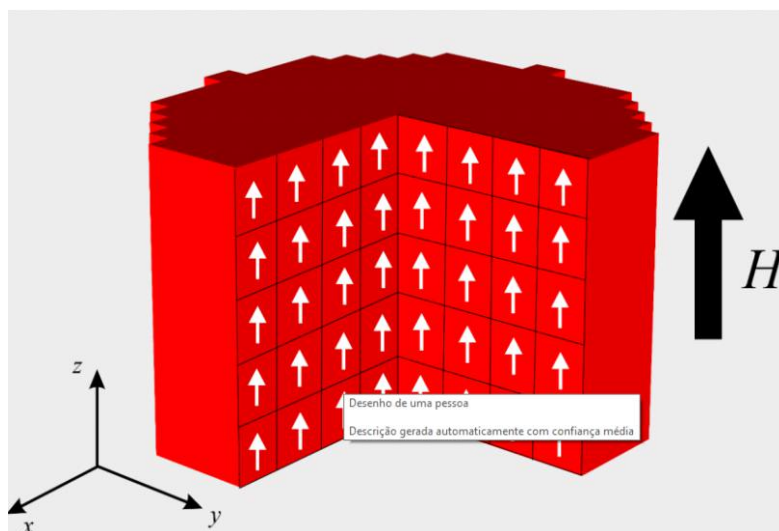
As simulações permitiram identificar os perfis magnéticos em remanência, bem como o padrão do campo magnético produzido pelas nanoestruturas. Essa etapa revelou como parâmetros geométricos e de composição podem impactar o comportamento magnético das nanoestruturas.

Portanto, a metodologia adotada uniu uma fundamentação teórica consistente à experimentação numérica detalhada, permitindo avaliar a viabilidade do uso de nanoestruturas cilíndricas como nano ímãs.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Apresentaremos a análise do perfil do campo magnético produzido por nanoestruturas com geometria cilíndrica. Tal estrutura é submetida inicialmente a um campo magnético externo aplicado ao longo do eixo do cilindro (eixo z), com intensidade suficiente para saturar a magnetização da amostra. A Figura 1 mostra uma representação esquemática do sistema.

Figura 1 - Representação esquemática de uma nanoestrutura cilíndrica submetida a ação de um campo magnético externo aplicado ao longo do eixo z .



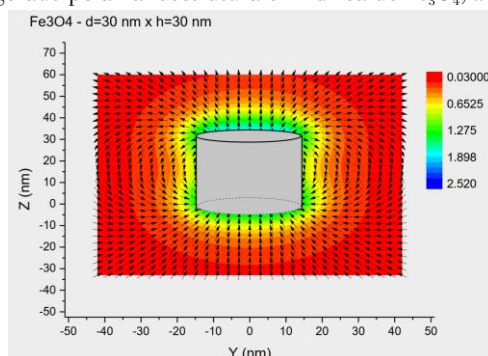
Fonte: Autores

Em seguida a intensidade do campo magnético foi reduzida até se obter o estado de magnetização remanente, $M(H = 0)$. Consideramos nanoestruturas com diâmetros de 30, 45 e 60 nm, onde para cada diâmetro foram consideradas alturas de 30, 60 e 90 nm. Tais dimensões são da ordem dos sistemas estudados recentemente pela academia e correspondem a dimensões de sistemas já empregados em dispositivos tecnológicos.

As figuras 2 a 4 apresentam uma visualização do perfil do campo magnético produzido por duas nanoestruturas distintas, sendo elas Fe_3O_4 com diâmetro de 30 nm e altura de 30 nm (Figura 2), SmCo_5 com diâmetro de 30 nm e altura de 30 nm (Figura 3) e $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ com diâmetro de 30 nm e altura de 30 nm (Figura 4). Nelas pode-se observar o mapa vetorial que representa o perfil do campo magnético produzido na região externa à nanoestrutura. Na face superior da nanoestrutura

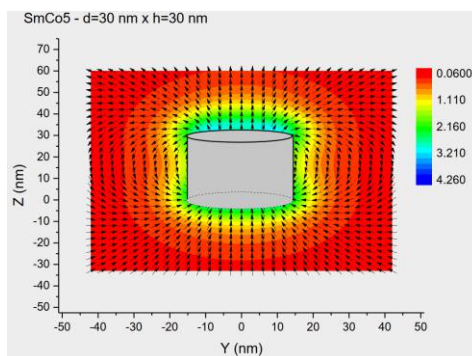
mostrada na Figura 3, por exemplo, o campo magnético aponta no sentido positivo do eixo z e possui uma intensidade média de 3.5 kOe. A intensidade do campo diminui se observarmos pontos relativamente distantes da nanoestrutura. Por exemplo, se fixarmos a coordenada z em meia altura da nanoestrutura pode-se observar que a 6 nm de distância em relação à superfície lateral a intensidade do campo magnético é de cerca de 2,68 kOe. Aumentando ainda mais a distância em relação à superfície lateral pode-se observar que o campo diminui consideravelmente, por exemplo, para uma distância de 12 nm a intensidade do campo magnético é de 0.5 kOe. É importante notar que, nestes dois últimos pontos citados, o campo magnético aponta no sentido negativo do eixo z.

Figura 2 - Campo gerado pela nanoestrutura cilíndrica de Fe_3O_4 , $d = 30\text{nm}$ e $h = 30\text{nm}$



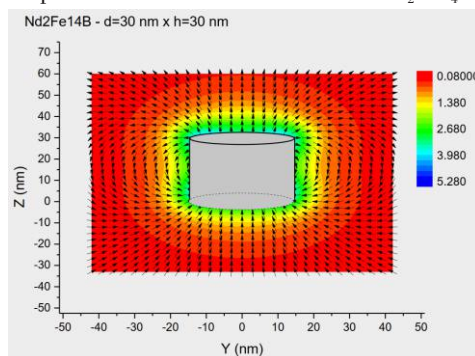
Fonte: Autores

Figura 3 - Campo gerado pela nanoestrutura cilíndrica de SmCo_5 , $d = 30\text{nm}$ e $h = 30\text{nm}$



Fonte: Autores

Figura 4 - Campo gerado pela nanoestrutura cilíndrica de $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$, $d = 30\text{nm}$ e $h = 30\text{nm}$

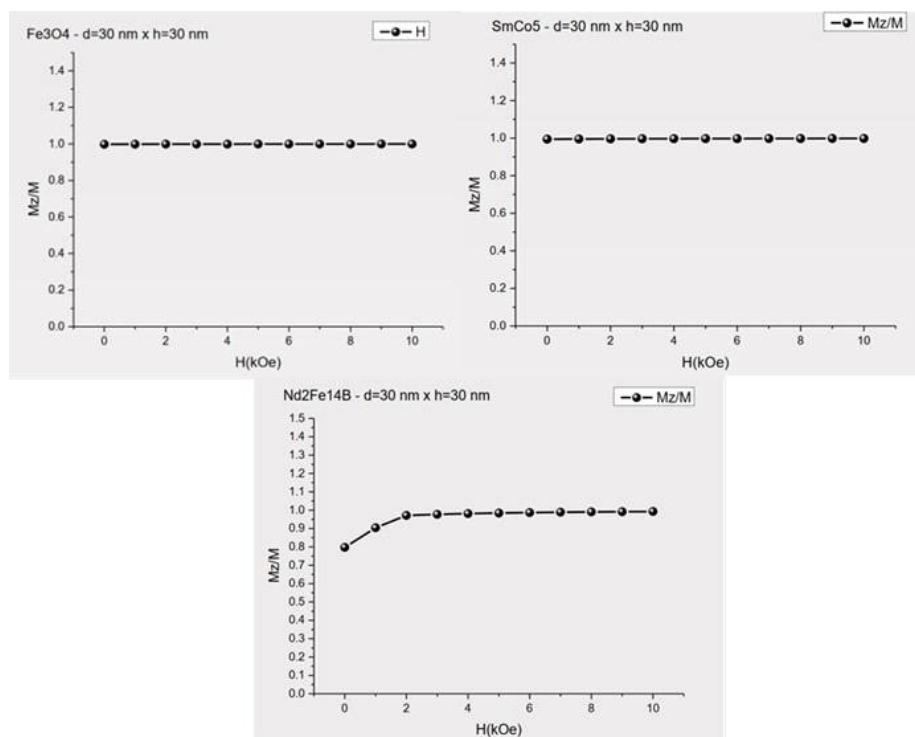


Fonte: Autores

Ainda com base nas referidas figuras, pode-se observar também que, apesar da variação na intensidade de cada um dos campos, conforme pode ser notado na barra de cores, onde os campos apresentam valores máximos de 2,52 kOe para o Fe_3O_4 (Figura 2), de 4,26 kOe para o SmCo_5 (Figura 3) e de 5,28 kOe para o $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ (Figura 4). O comportamento das linhas de campo sugere um perfil de magnetização uniforme das estruturas, para a dimensão de diâmetro $d = 30 \text{ nm}$ e altura $h = 30 \text{ nm}$, ou seja, para estruturas em que a razão entre o diâmetro e a altura é igual a 1, $h/d = 1$. O que também pode ser notado é a relação entre a magnetização de saturação do material M_s e a intensidade do campo gerado pela nanoestrutura. Nesse sentido, percebe-se que, enquanto o Fe_3O_4 tem $M_s = 0,485 \text{ kOe}$ e um campo variando entre 0,03 kOe e 2,52 kOe, o $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ tem $M_s = 1,282 \text{ kOe}$ e um campo variando entre 0,08 kOe e 5,28 kOe, para as dimensões em apreço nos gráficos. Dessa forma, ao se fixar as dimensões, observa-se a formação de um campo mais intenso à medida que M_s aumenta.

Para corroborar as percepções anteriormente colocadas, analisemos as curvas de magnetização das mesmas nanoestruturas. Considerando que M_z é a intensidade da magnetização na direção z e que M é a magnetização total, quanto mais próxima a razão M_z/M estiver de 1, maior é a uniformidade do perfil de magnetização do material na situação em análise. Pode-se observar, ainda na Figura 5, que a magnetização é basicamente uniforme, exceto para a curva de magnetização do $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$, onde houve uma redução de cerca de 20% em remanência.

Figura 5 - Curvas de magnetização gerada pela nanoestrutura cilíndrica de Fe_3O_4 , SmCo_5 e $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$, com dimensões $d = 30 \text{ nm}$ e $h = 30 \text{ nm}$

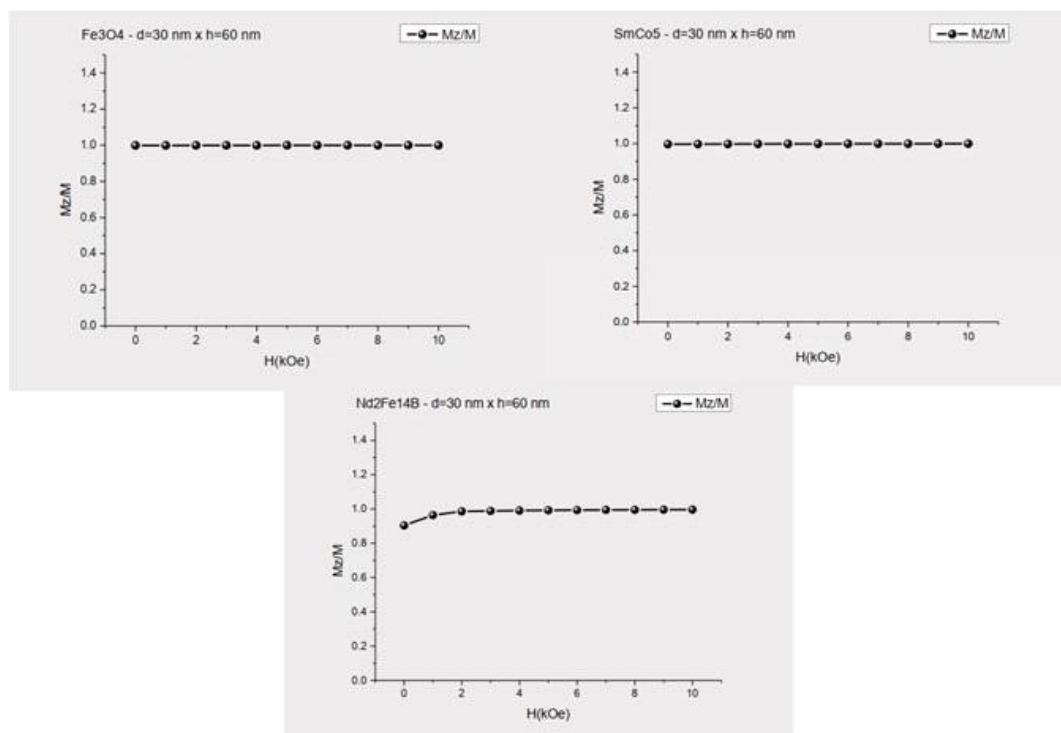


Fonte: Autores (2021).

Analisemos agora estruturas em que $h/d=2$, as quais podem ser observadas na Figura 6. Em tais sistemas percebe-se que, embora ainda exista um desvio na curva de magnetização da nanoestrutura de maior M_s ($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$), esse desvio é da ordem de 10%, menor do que o verificado na mesma nanoestrutura quando $h/d=1$. Ao compararmos também as curvas apresentadas na Figura 7, onde a $h/d=3$, o desvio é ainda menor, chegando a aproximadamente 5%, para o $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$. Fato relevante a ser comentado é que, dentre as nanoestruturas simuladas, aquelas que apresentaram um perfil de magnetização mais uniforme foram as de $d = 30 \text{ nm}$ e $h = 90 \text{ nm}$, mesmo em materiais de M_s mais alta.

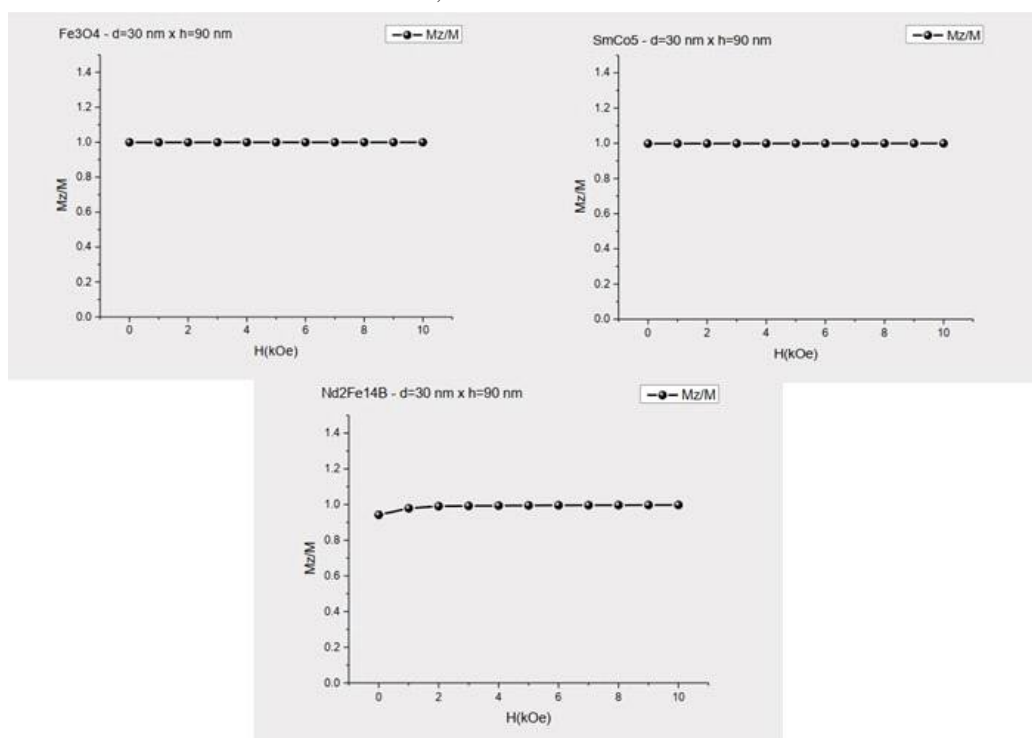
Outro ponto importante notado nas análises das simulações foi a perda de uniformidade da magnetização de saturação em determinadas dimensões estruturais. Conforme pode ser visto nas Figuras 8 e 9, fixando-se a altura em $h = 30 \text{ nm}$ e simulando diâmetros de $d = 45 \text{ nm}$ e $d = 60 \text{ nm}$, respectivamente, se obtém curvas com considerável perda de intensidade de magnetização na direção z . Apesar de ocorrer mais acentuadamente na nanoestrutura de $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$, que possui M_s mais alta, o citado fenômeno também pode ser verificado nas outras duas nanoestruturas simuladas, as quais apresentam um M_s mais baixo.

Figura 6 - Curvas de magnetização geradas por nanoestruturas cilíndricas de Fe_3O_4 , SmCo_5 e $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$, com $d = 30 \text{ nm}$ e $h = 30 \text{ nm}$



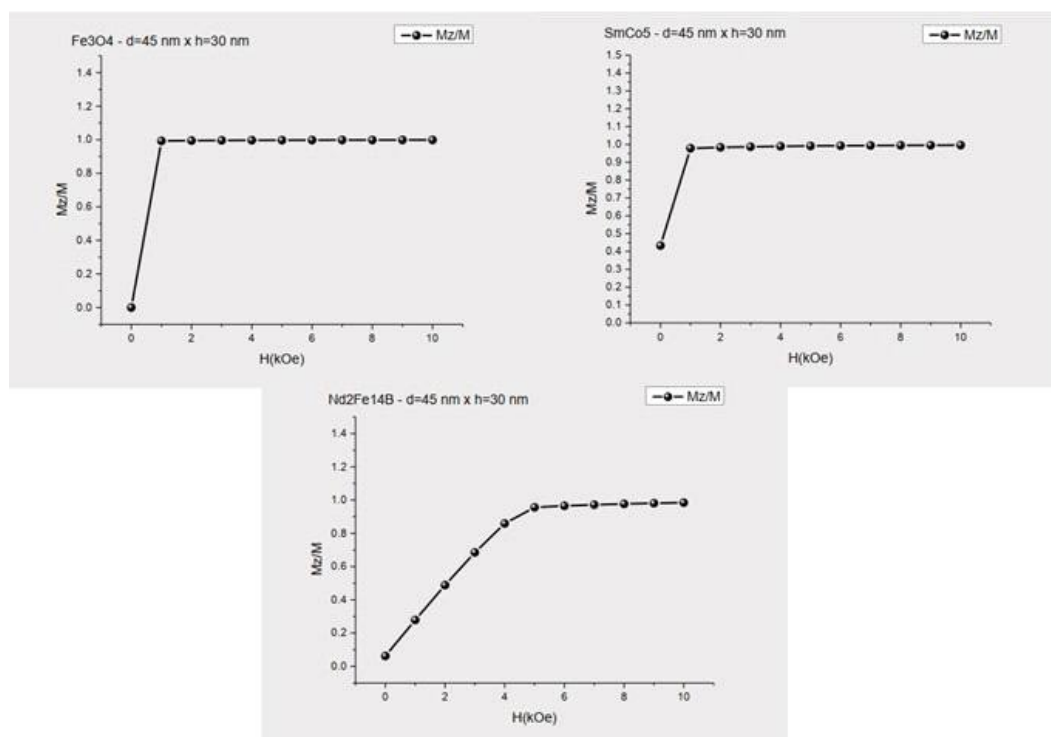
Fonte: Autores (2021).

Figura 7 - Curvas de magnetização geradas por nanoestruturas cilíndricas de Fe₃O₄, SmCo₅ e Nd₂Fe₁₄B, com $d = 30\text{nm}$ e $h = 90\text{nm}$



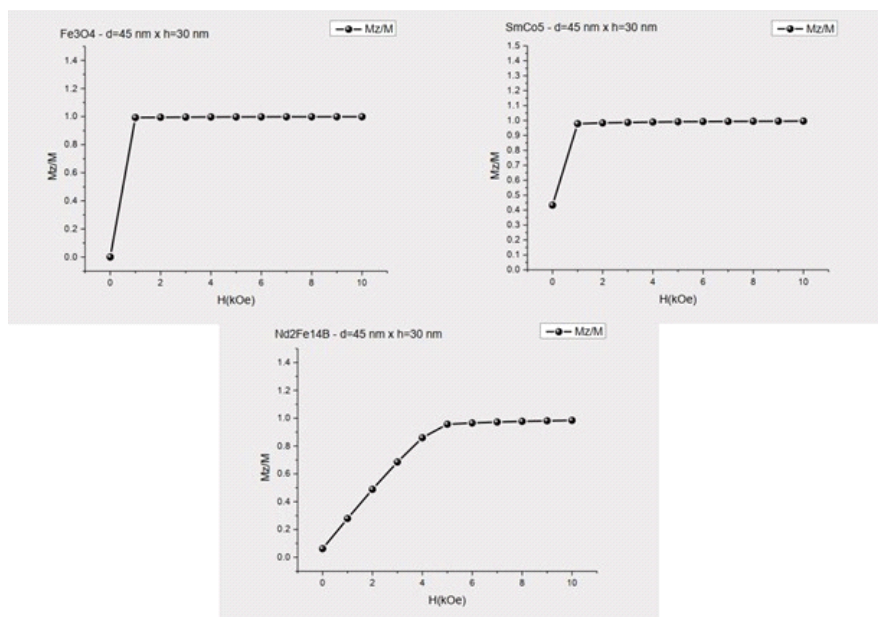
Fonte: Autores (2021).

Figura 8 - Curvas de magnetização geradas por nanoestruturas cilíndricas de Fe₃O₄, SmCo₅ e Nd₂Fe₁₄B, com $d = 45\text{nm}$ e $h = 30\text{nm}$



Fonte: Autores (2021).

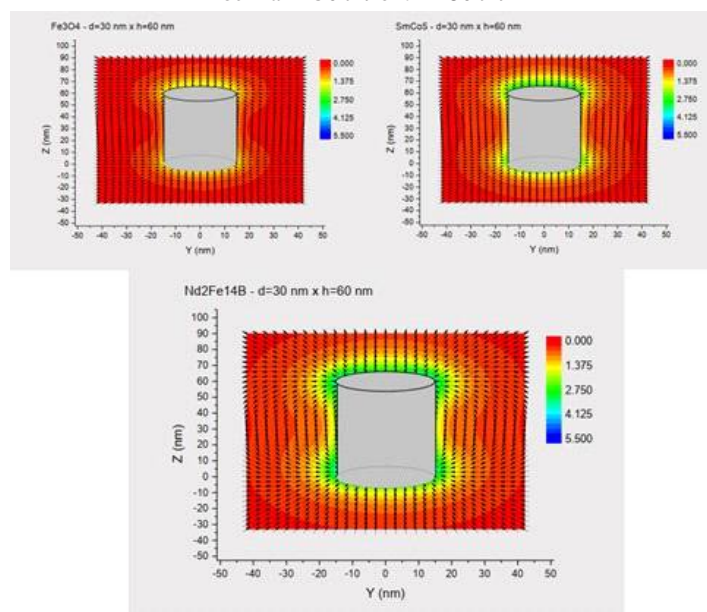
Figura 9 - Curvas de magnetização geradas por nanoestruturas cilíndricas de Fe₃O₄, SmCo₅ e Nd₂Fe₁₄B, com $d = 45\text{nm}$ e $h = 30\text{nm}$



Fonte: Autores (2021).

Vamos analisar a distribuição do campo no entorno das nanoestruturas, bem como essa distribuição varia em algumas nanoestruturas. Para se fazer esta análise, escolhemos as nanoestruturas de $d = 30\text{ nm}$ e $h = 60\text{ nm}$ e $d = 30\text{ nm}$ e $h = 90\text{ nm}$, pois elas apresentaram curvas de magnetização mais uniformes que as demais. Ademais, para fins de padronização, optou-se por fixar a escala de cores para o intervalo de campo de $[0\text{ kOe}, 5.5\text{ kOe}]$.

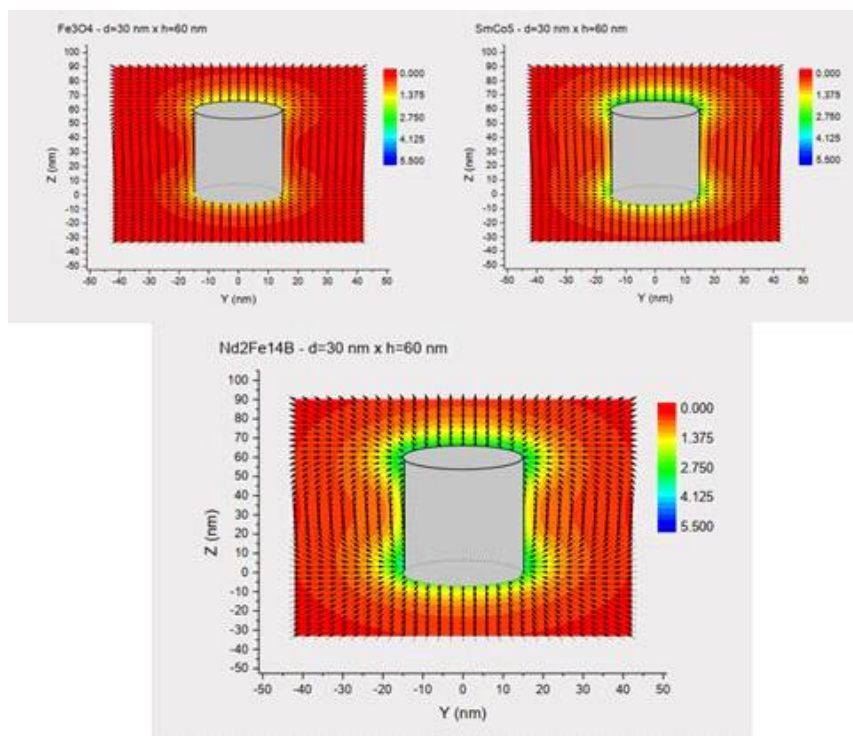
Figura 10 - Campos gerados pelas nanoestruturas cilíndricas de Fe₃O₄, SmCo₅ e Nd₂Fe₁₄B, com $d = 30\text{nm}$ e $h = 60\text{nm}$



Fonte: Autores (2021).

Conforme se pode observar pela distribuição das cores, para nanoestruturas de dimensões descritas na Figura 10, a intensidade do campo é maior no entorno do cilindro composto por $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ e menor no entorno do cilindro composto por Fe_3O_4 . Ao relacionarmos esse fato com os valores de M_s de cada material, observamos, na situação em análise, que a intensidade do campo é maior quanto maiores forem os valores de magnetização de saturação do material. Ressalte-se ainda o fato de as maiores intensidades de campo estarem concentradas nas superfícies superiores e inferiores das nanoestruturas, ao passo que, nas superfícies laterais, essa intensidade é menor. No entanto, nanoestruturas com altura mais elevada podem ter a configuração do campo alterada. Veja na Figura 11 o que a variação na altura pode provocar. Na referida figura, fica clara a redução da intensidade do campo ao se alongar na nanoestrutura cilíndrica. Tanto nas superfícies superiores e inferiores quanto nas superfícies laterais, verifica-se, apenas pela distribuição de cores, um campo menos intenso quando a altura $h = 90\text{nm}$. Traduzindo isso em valores, avaliando-se o composto de $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$, podemos citar o exemplo da intensidade de 0.9 kOe do campo em meia altura na nanoestrutura de dimensões $30\text{nm} \times 60\text{nm}$, percorrendo 3nm no sentido negativo do eixo y , a partir da superfície lateral. Em contrapartida, temos, à mesma altura e no mesmo ponto do eixo y , um campo cuja intensidade é 0.47 kOe , na estrutura de $30\text{nm} \times 90\text{nm}$, para o mesmo material. Esse padrão também é percebido nas nanoestruturas dos demais compostos.

Figura 11 - Campos gerados pelas nanoestruturas cilíndricas de Fe_3O_4 , SmCo_5 e $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$, com $d = 30\text{ nm}$ e $h = 60\text{ nm}$



Fonte: Autores (2021).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em relação aos perfis magnéticos das estruturas submetidas às simulações computacionais, o que se pôde observar no decorrer das análises efetuadas é que estas estruturas apresentaram configurações mais estáveis em determinadas dimensões. Pode-se citar, como exemplo de disposição estrutural com magnetização mais uniformemente distribuída, as nanoestruturas de $d = 30 \text{ nm}$ e $h = 90 \text{ nm}$.

Outro fenômeno importante notado nas análises das simulações foi a perda de uniformidade da magnetização em determinadas dimensões estruturais, principalmente quando se promovia uma redução na altura da nanoestrutura cilíndrica. Uma das relações mais claramente observadas foi a influência da magnetização de saturação do material nos resultados obtidos. Durante as análises se pôde perceber que materiais com altos valores de magnetização de saturação (M_s) respondiam de maneira mais intensa às variações dimensionais, no que se refere à uniformidade de magnetização da estrutura após a aplicação de um campo externo.

Quanto mais alto era valor de M_s , menos uniforme era o perfil de magnetização da nanoestrutura quando se variavam os parâmetros dimensionais. Nesse contexto, futuras abordagens com o fito de dar continuidade a este trabalho podem envolver simulações em uma diversidade maior de dimensões e geometrias, o que não foi possível aqui pelas limitações de tempo e em equipamentos de informática. Nesse sentido, explorar o perfil do campo magnético produzido por estruturas com simetrias diferentes, tais como retangulares e esféricas, auxiliaria em uma maior compreensão do perfil das fases magnéticas que as nanoestruturas apresentam, como função de seus parâmetros geométricos.

REFERÊNCIAS

AGRA, A. L. F.; QUEIROZ JÚNIOR, I. S.; QUEIROZ, S. K. S. S. Estudo da interação entre nanoelementos magnéticos planares. 2018. 14 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Ciência e Tecnologia) - Universidade Federal Rural do Semiárido, Mossoró, 2018.

BASTOS, Cleverson Leite; KELLER, Vicente. Aprendendo a aprender: introdução à metodologia científica. Petrópolis: Vozes, 1991.

JIMENEZ-VILLACORTA, L. H. L. F. Advanced permanent magnetic materials. In: Nanomagnetism. [S.l.: s.n.], 2014. cap. 7, p. 160-189.

KÖCHE, José Carlos. Fundamentos de metodologia científica: teoria da ciência e prática da pesquisa. 24. ed. Petrópolis: Vozes, 2006.

LANDI, G. T. Simulações estocásticas de nanopartículas magnéticas. 2012. 106 f. Tese (Doutorado em Ciências) - Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

OLIVEIRA, L. L. Nanoestruturas magnéticas do tipo núcleo-casca: um estudo do impacto do campo dipolar. 2016. 153 f. Tese (Doutorado em Física) - Departamento de Física Teórica e Experimental, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

PESSOA, N. L. Controles de paredes de domínio em nanoanéis de NiFe em estruturas núcleo-casca cilíndricas com acoplamento dipolar. 2017. 78 f. Dissertação (Mestrado em Física) - Departamento de Física Teórica e Experimental, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.

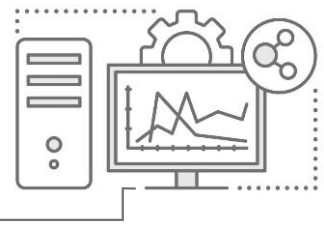
REZENDE, S. M. Nanomagnetismo. Comciência, 2002. Disponível em: <https://www.comciencia.br/dossies-1-72/reportagens/nanotecnologia/nano14.htm>. Acesso em: 29 ago. 2021.

SAMPAIO, G. M.; BRANDL, A. L.; FALLEIROS, J. P. B. Nanopartículas Magnéticas: Simulações de Curvas de Magnetização e Função do Campo para o Regime Superparamagnético. Physicae Organum, Brasília, v. 4, n. 1, 2018. Disponível em: <https://periodicos.unb.br/index.php/physicae/article/view/12618>. Acesso em: 01 jun. 2021.

SATO, H. et al. 14ns write speed 128Mb density Embedded STT-MRAM with endurance >1010 and 10yrs retention @85°C using novel low damage MTJ integration process. In: IEEE INTERNATIONAL ELECTRON DEVICES MEETING (IEDM), 2018. Anais [...]. [S.l.]: IEEE, 2018. p. 27.2.1-27.2.4.

SOUZA, C. M. Efeitos termomagnéticos em aglomerados de nanopartículas magnéticas. 2019. 142 f. Tese (Doutorado em Física) - Departamento de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.





CAPÍTULO 12

DOI: 10.63951/synapse978-65-88890-61-5_12

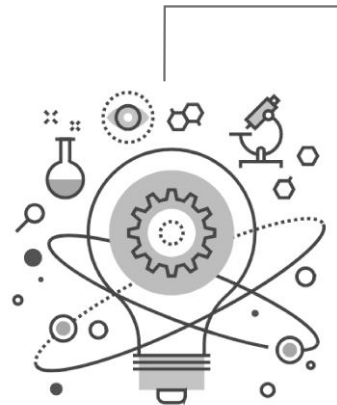
NATANE MARTINIANO DOS SANTOS^{1,2}
BRÁULIO BATISTA SOARES²

USO DA TRANSFORMADA DE FOURIER NA BUSCA DE INDÍCIOS DE TRÂNSITO DE EXOPLANETA EM CURVA DE LUZ DE ESTRELAS

Resumo

Em resposta aos significativos avanços tecnológicos na astronomia da última década, este estudo dedicou-se à identificação de variações periódicas no brilho estelar mediante a aplicação da Transformada de Fourier em curvas de luz. A análise, processada no ambiente RStudio com dados obtidos da NASA, concentrou-se em quatro sistemas: dois confirmados e dois candidatos a abrigarem exoplanetas. A metodologia baseou-se na conversão de dados do domínio temporal para o frequencial, permitindo a determinação de períodos orbitais. Os resultados demonstraram consonância com os valores oficiais para dois dos sistemas, enquanto os demais apresentaram discrepâncias atribuíveis às diferenças metodológicas adotadas. Conclui-se que a técnica mostrou-se eficaz como ferramenta auxiliar na detecção indireta de exoplanetas, reforçando sua aplicabilidade em investigações astrofísicas.

Palavras-chave: Exoplanetas; Curvas de luz; Transformada de Fourier.



¹ Universidade Federal do Rio Grande do Norte

² Universidade do Estado do Rio Grande do Norte

Abstract

In response to the significant technological advances in astronomy over the past decade, this study has been dedicated to identifying periodic variations in stellar brightness through the application of the Fourier Transform to light curves. The analysis, processed in the RStudio environment using data obtained from NASA, focused on four systems: two confirmed and two candidate exoplanet hosts. The methodology was based on the conversion of data from the time domain to the frequency domain, enabling the determination of orbital periods. The results demonstrated consistency with official values for two of the systems, while the others showed discrepancies attributable to methodological differences. It is concluded that the technique proved effective as an auxiliary tool for the indirect detection of exoplanets, reinforcing its applicability in astrophysical research.

Keywords: *Exoplanets; Light curves; Fourier Transform.*

INTRODUÇÃO

A astronomia constitui uma das mais antigas e nobres ciências, dedicada ao estudo sistemático dos corpos celestes — estrelas, planetas e demais objetos que habitam o cosmo. Seu escopo ultrapassa a mera contemplação do firmamento, abrangendo a investigação da origem e evolução dos astros, os fenômenos físicos e químicos que os regem, bem como os movimentos que estruturam a dinâmica do universo. Desde as primeiras civilizações, tal saber revelou-se essencial para a organização da vida em sociedade. A navegação marítima, guiada pela leitura das estrelas, e a agricultura, regulada pela observação atenta dos ciclos celestes, ilustram de forma eloquente o papel fundacional da astronomia no desenvolvimento cultural e científico da humanidade (Saraiva, 2004).

Por essa influência na civilização, a indagação sobre o que existe além da Terra mantém-se atual e encontra algumas respostas nos avanços tecnológicos que ampliam a compreensão dos fenômenos extraterrestres. Tal inquietação sustenta a busca por planetas em outros sistemas estelares, com o propósito de conhecer e caracterizar suas condições (Borges, 2022). Planetas descobertos além do nosso sistema solar denominam-se exoplanetas, ou planetas extrassolares. Embora numerosas descobertas tenham ocorrido, a detecção de exoplaneta é uma tarefa intrincada devido à sua proximidade com a estrela hospedeira, o que dificulta sua observação direta. Novas tecnologias, entretanto, têm possibilitado detectar parâmetros estelares, como o período orbital, que indicam a presença de planetas mesmo sem observá-los diretamente, inferindo-os por meio de parâmetros físicos e químicos observados de sua estrela (Saad Oliveira, 2019). O trânsito de um objeto celeste diante de sua estrela, por exemplo, gera uma variação luminosa que permite inferir parâmetros físicos, como a massa e o período orbital de um exoplaneta (Santos, 2017; Souza, 2019; Crispim; Brito, 2023; Barroso; Oliveira; Jesus, 2020).

Com o intuito principal de determinar trânsitos em torno de estrelas, lançada em 2009 pela NASA, a missão Kepler confirmou a existência de mais de 5.830 exoplanetas, consolidando-se como um marco na astronomia. Conforme Dunbar (2018), seu objetivo principal era investigar a estrutura e a diversidade de sistemas planetários, determinando propriedades como massa, densidade e a localização de zonas habitáveis. A análise da curva de luz estelar — cuja periodicidade indica o trânsito de um planeta à frente de sua estrela — permitiu deduzir o período orbital e outras características físicas. Essas variações, captadas pelo telescópio, foram examinadas no domínio da frequência mediante a técnica de transformada de Fourier, assegurando precisão na extração de dados.

Com esse fundamento, o presente estudo aplica a Transformada de Fourier às curvas de luz da missão Kepler, a fim de identificar oscilações periódicas no brilho

estelar, frequentemente associadas à presença de exoplanetas. O emprego dessa técnica, tradicionalmente consolidada no tratamento de sinais, permite decompor as curvas em suas componentes harmônicas e, assim, discriminar padrões sutis ocultos no ruído observacional. Inicialmente, a metodologia foi validada a partir de sistemas já confirmados — os exoplanetas 296e e 62e — cujos parâmetros orbitais serviram de referência para aferir a robustez do procedimento. Em seguida, o método foi estendido a alvos não confirmados, como KOI 369.01 e KOI 638.01, de modo a avaliar sua capacidade preditiva na detecção de candidatos planetários. Os períodos orbitais resultantes mostraram-se consistentes com os registros oficiais da NASA, corroborando a eficácia da abordagem e evidenciando sua relevância para investigações futuras no campo da astrofísica exoplanetária.

Para melhor estruturar a investigação, o artigo organiza-se da seguinte forma: inicia-se com a definição e a classificação dos exoplanetas; em seguida, apresenta-se a missão Kepler e discutem-se as Leis de Kepler e sua importância para a astronomia moderna. Posteriormente, examinam-se as curvas de luz e os métodos de detecção empregados, avançando-se para a análise matemática fundamentada na Série de Fourier. Na sequência, descrevem-se a metodologia adotada, os resultados obtidos e sua discussão crítica, bem como a implementação computacional dos códigos para determinação das frequências características. Prosseguindo, apresentam-se análises complementares, a comparação dos resultados com dados de referência e, por fim, as considerações finais, que sintetizam as principais contribuições e perspectivas deste trabalho.

1.2. EXOPLANETAS: DEFINIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO

Exoplanetas são corpos celestes que orbitam estrelas fora do nosso Sistema Solar (Des Etangs; Lissauer, 2022). A maioria situa-se a distâncias interestelares da Terra, o que complica a análise de seus fenômenos físicos, mas permite investigar suas atmosferas, temperaturas e possíveis bioassinaturas (Brennan, 2018).

Esses planetas exibem notável diversidade, variando em tamanho desde maiores que Júpiter até menores que Marte. Seu período orbital é determinado por essa dimensão e pelo raio de sua órbita. A temperatura, por sua vez, depende da proximidade com a estrela hospedeira, sendo fator crucial para a habitabilidade, que requer condições térmicas específicas.

Conforme NASA (2025), os exoplanetas classificam-se, principalmente, em:

- *Gigantes Gasosos*: De dimensões iguais ou superiores a Júpiter. Incluem os Júpiteres Quentes, que orbitam extremamente próximos de suas estrelas, atingindo temperaturas extremas.

- *Netunos e Mini-Netunos*: Planetas de tamanho similar a Netuno ou menores, sem equivalentes diretos no nosso sistema. Possuem atmosferas de hidrogênio e hélio sobre um núcleo rochoso.
- *Super-Terras*: Mais massivos que a Terra, porém menos que Netuno, com composição que pode ser gasosa, rochosa ou mista.
- *Planetas Terrestres*: De tamanho similar ou inferior ao da Terra, compostos predominantemente por rocha, silicatos, água ou carbono. São os principais candidatos para estudos futuros sobre atmosferas e habitabilidade.

Os avanços na pesquisa de exoplanetas ampliam a perspectiva de descobrir mundos habitáveis. Em maio de 2024, astrônomos identificaram um planeta potencialmente habitável a 40 anos-luz da Terra, usando o telescópio TESS da NASA (Will, 2025). Em abril de 2025, detectaram na atmosfera do exoplaneta K2-18b moléculas como dimetil sulfeto e dissulfeto de dimetila, possíveis indicadores de vida microbiana (Nangino, 2025). Contudo, ainda não se confirmou a existência de seres vivos nesses mundos. Diante da inevitável extinção do Sistema Solar em bilhões de anos, a busca por exoplanetas não só expande nosso conhecimento cósmico, mas pode também revelar futuros refúgios para a vida.

1.3. A MISSÃO KLEPER

A NASA revolucionou a busca por exoplanetas, uma vez que o propósito central dessa missão era detectar planetas de dimensões terrestres ou superiores situados na zona habitável de suas estrelas, onde a água pode subsistir em estado líquido, expandindo notavelmente nosso conhecimento sobre mundos extrassolares (Borucki *et al.*, 2010).

Os estudos realizados a partir das medidas observadas pela missão empregaram diversos métodos a fim de detectar trânsitos planetários ao redor de estrelas. Um desses métodos de detecção de exoplanetas consiste no estudo da oscilação periódica no brilho estelar durante suas passagens diante da estrela. O telescópio Kepler monitorou continuamente cerca de 150.000 estrelas na constelação de Lira, identificando mais de 2.600 exoplanetas confirmados e milhares de candidatos, o que revolucionou o conhecimento sobre a diversidade planetária. Com a avaria de dois giroscópios, a missão foi reorientada para a fase K2, expandindo a pesquisa para novos campos celestes (NASA, 2018).

Após a detecção automatizada de trânsitos e a filtragem de falsos positivos, as curvas de luz promissoras eram classificadas como KOI, indicando alta probabilidade de conterem planetas (Monteiro, 2018).

1.4. SOBRE CURVAS DE LUZ

Segundo Castrillón (2010), a curva de luz configura-se como a representação gráfica da flutuação do brilho estelar ao longo do tempo, cuja análise permite investigar os processos físicos que regem os astros e detectar a presença de corpos massivos em suas órbitas (Perriman; Sackett, 2019). O método de trânsito, essencial na descoberta de exoplanetas, identifica-os por meio de diminuições periódicas de luminosidade, cujas características — como profundidade, duração e periodicidade — revelam propriedades do corpo celeste, incluindo dimensões e composição atmosférica (Seager; Mallén-Ornelas, 2003). Ademais, tais curvas são igualmente fundamentais para o estudo de estrelas variáveis, binárias eclipsantes e sistemas complexos, desvendando processos estelares como pulsações e interações gravitacionais, o que, em conjunto com outras técnicas observacionais, aprofunda a compreensão da dinâmica estelar.

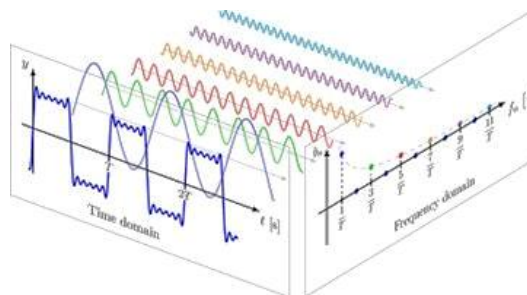
1.5. MÉTODOS DE DETECÇÃO

A técnica de trânsito astronômico consolida-se como o método primordial na detecção de exoplanetas, cujo princípio reside na mensuração de ínfimas e periódicas diminuições no fluxo luminoso estelar, ocasionadas pela passagem de um planeta entre o observador e a estrela observada. Por meio de fotometria de alta precisão, esse evento transitório não apenas permite deduzir o raio planetário em relação ao astro, como também fornece, através de sua duração e perfil, parâmetros fundamentais acerca da arquitetura orbital e da densidade estelar.

1.6. ANÁLISE MATEMÁTICA

A série de Fourier permite a representação de funções periódicas mediante uma combinação linear de senos e cossenos (Kreyszig, 2009). Sua aplicabilidade, contudo, circunscreve-se a fenômenos de periodicidade definida ou a intervalos finitos repetidos. Para funções não periódicas ou de domínio infinito, recorre-se à transformada de Fourier, que expande esse princípio ao plano dos sinais contínuos, transpondo a análise do domínio temporal para o domínio das frequências (Nunes et al., 2025; Lorenzana, 2022; Cabrera; Villanueva; García, 2025).

Figura 1 - Visualização de um sinal no domínio do tempo e da frequência



Fonte: DIBS Methods Meetings. Fourier transforms. Disponível em: <<https://dibsmethodsmeetings.github.io/fourier-transforms/>>. Acesso em: 30 set. 2025.

2. METODOLOGIA

A metodologia fundamentou-se na análise de quatro curvas de luz da missão Kepler, sendo duas de sistemas com exoplanetas confirmados e duas de candidatos ainda não validados. Inicialmente, expõe-se o critério de seleção que distingue os conjuntos de dados. Na sequência, detalham-se as etapas de desenvolvimento e aplicação dos algoritmos para extrair e interpretar as frequências características que indicam a presença de planetas extrassolares.

Com fundamento em curvas de luz extraídas do catálogo da NASA, a análise elegeu as estrelas Kepler-62 e Kepler-296 por se situarem na zona habitável, região que favorece a existência de água em estado líquido e, conseqüentemente, a possibilidade de vida. Ambos os sistemas, localizados na constelação de Lyra, orbitam estrelas de dimensões e luminosidade inferiores às solares e abrigam, cada um, cinco exoplanetas. Ademais, foram incluídos os candidatos exoplanetários KIC 4252322 e KIC 7630229, cuja confirmação orbital ainda é pendente.

Para o processamento dos dados, empregou-se o ambiente RStudio (Wickham *et al.*, 2017), que viabiliza a análise estatística e a aplicação da Transformada Rápida de Fourier, essencial para o exame espectral. Após a aquisição das curvas de luz, que registram a variação do fluxo energético ao longo do tempo, os dados foram tratados e visualizados por meio de algoritmos específicos, permitindo a geração de gráficos representativos da variação luminosa dos sistemas estudados. A análise espectral, obtida pela conversão desses dados ao domínio da frequência via Transformada de Fourier, torna identificável seus componentes predominantes.

Obtivemos quatro curvas de luz: as confirmadas 62e e 296e, e as não validadas 4252322 e 7630229. Para determinar suas frequências predominantes e compará-las com dados da NASA, implementamos as curvas no RStudio, um ambiente computacional especializado em análise estatística e visualização gráfica mediante a linguagem R.

As curvas, que relacionam fluxo energético e tempo, foram convertidas para o formato .dat e importadas para o software. Os códigos correspondentes geraram os gráficos, permitindo a análise inicial das estrelas com exoplanetas confirmados (62 e 296) e, posteriormente, daquelas com candidatos não confirmados (4252322 e 7630299).

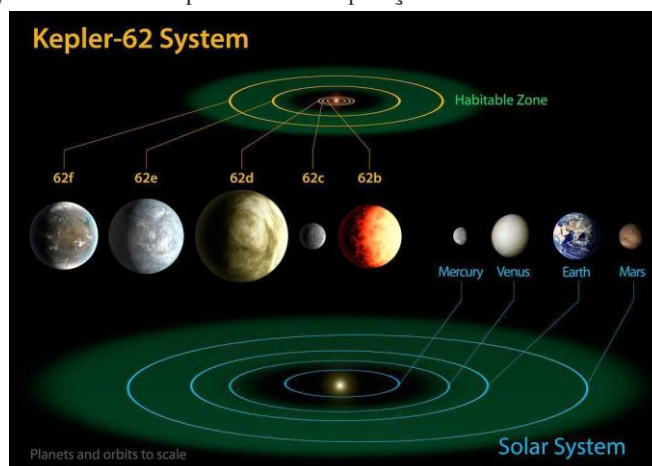
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O estudo analisa duas curvas de luz validadas e outras duas não confirmadas. Para assegurar a fundamentação, utilizamos dados da NASA, a fim de verificar a consonância de nossos resultados com a referência oficial. As estrelas confirmadas, 62 (Borucki *et al.*, 2013) e 296 (Barclay *et al.*, 2015), foram

selecionadas por localizarem-se na zona habitável – região propícia à existência de água líquida, condição essencial para a vida. Já as não confirmadas foram eleitas aleatoriamente.

A estrela Kepler-62 (NASA, 2013), localizada na constelação de Lyra a 1.200 anos-luz da Terra, possui cinco exoplanetas em sua órbita: 62b, 62c, 62d, 62e e 62f. Com dois terços do tamanho do Sol e apenas um quinto de seu brilho, essa estrela abriga os exoplanetas 62e e 62f em sua zona habitável. Segue uma imagem comparativa entre o sistema Kepler-62 e o Sistema Solar.

Figura 2: Sistema Kepler-62 em comparação com o nosso sistema solar



Fonte: NASA, 2013.

<https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2023/03/742666main_Kepler-62-Diagram_lg_full.jpg>

Acesso em: 30 set. 2025.

Tabela 1: Períodos orbitais de exoplanetas de Kepler-62 e de Kepler-296.

Exoplanetas	Período Orbital (Dias)
62b	5.714932 ± 0.000009
62c	12.4417 ± 0.0001
62d	18.16406 ± 0.00002
62e	122.3874 ± 0.0008
62f	267.291 ± 0.005
296b	$10.864384^{+0.000051}_{-0.000046}$
296c	5.8416366 ± 0.0000100
296d	$19.850291^{+0.000061}_{-0.000057}$
296e	34.14211 ± 0.00025
296f	$63.33627^{+0.00060}_{-0.00062}$
4252322 (não confirmado)	14.591504451 ± 8.90106
7630229 (não confirmado)	$278.1243979 \pm 0.0004437$

Fonte: NASA, 2019.

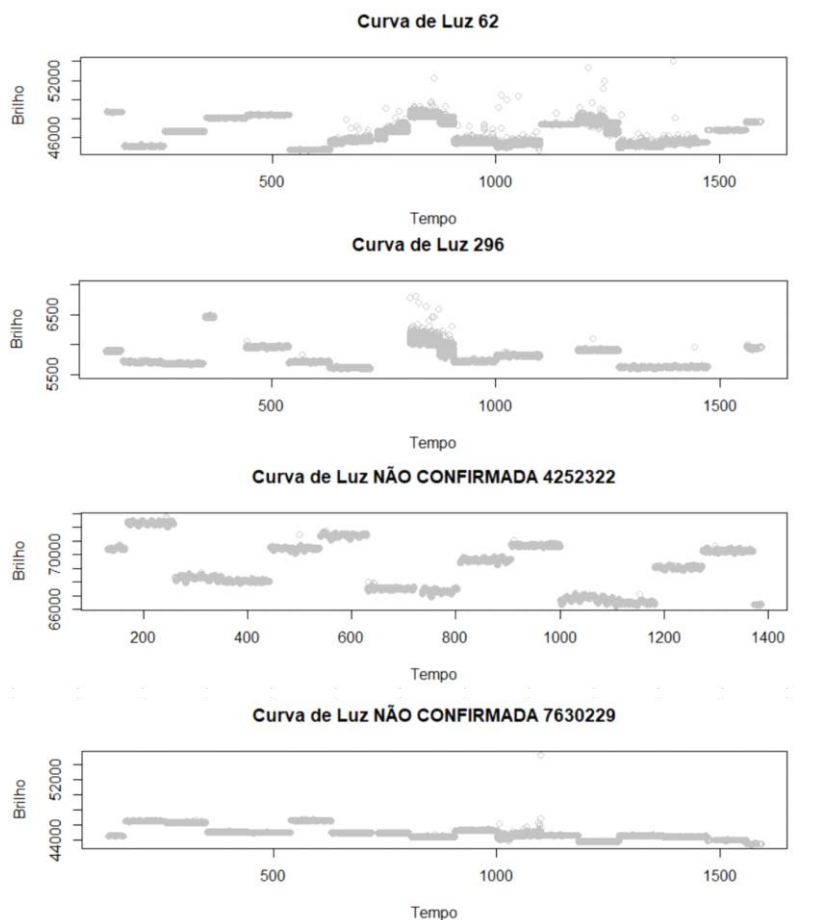
O sistema planetário Kepler-296 (NASA, 2014), localizado na constelação de Lyra a 1.089 anos-luz do Sol, é composto por cinco exoplanetas em órbita: 296b, 296c, 296d, 296e e 296f. Sua estrela hospedeira é uma anã vermelha, de temperatura aproximada de 3.500 K, integrante de um sistema binário. As estrelas desse sistema possuem massas e raios equivalentes a, respectivamente, 0,626 ou 0,453 e 0,595 ou 0,429 massas e raios solares.

Conforme a Terceira Lei de Kepler, o período orbital de cada exoplaneta está diretamente relacionado à sua distância da estrela. Assim, o planeta 62f, por estar mais distante, apresenta o maior período, enquanto o 62b, por orbitar mais próximo, sofre maior atração gravitacional e, conseqüentemente, possui o período mais curto.

Os exoplanetas ainda não confirmados permanecem sob análise, sendo indeterminado o número de corpos que orbitam a estrela hospedeira. A seguir, listam-se os períodos orbitais identificados pela NASA.

KIC 4252322 constitui um sistema binário eclipsante, enquanto KIC 7630229 é uma estrela de rotação variável, ambas de magnitude solar equivalente. Conforme Maciel (2011), sistemas binários eclipsantes caracterizam-se por possuir planos orbitais aproximadamente alinhados com a linha de visada do observador, o que provoca o mútuo eclipse entre seus componentes.

Figura 3: Curvas de luz das estrelas hospedeiras estudadas.



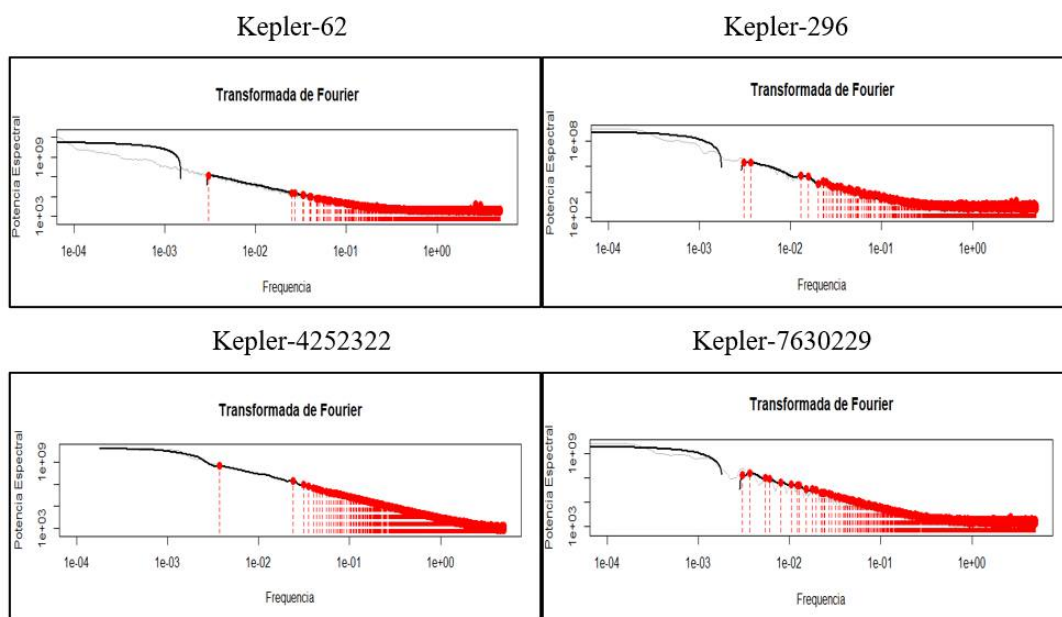
Fonte: NASA, 2019.

Cada curva de luz exhibe espaçamentos distintos entre as magnitudes de fluxo, representando elementos no domínio do tempo. A identificação das principais frequências se dá, portanto, por meio da transformação desses dados temporais em funções frequenciais.

3.1. ANÁLISES E RESULTADOS

Esta seção expõe os resultados da análise das curvas de luz elaboradas anteriormente, destacando as frequências identificadas nas quatro amostras. Comparam-se, assim, os períodos das estrelas confirmadas com os das não confirmadas, além de confrontar os dados obtidos mediante a transformada de Fourier com os resultados da NASA. A exposição divide-se em: resultados dos astros confirmados, dos não confirmados e a comparação com os referidos dados da NASA.

Figura 4: Transformadas de Fourier das curvas de luz das estrelas estudadas.



Fonte: Autores (2019).

Após a conversão dos dados temporais para o domínio da frequência no RStudio, identificaram-se as frequências primárias associadas aos exoplanetas. No espectro, as coordenadas representam a potência espectral (eixo Y), que descreve a distribuição de variância, e a frequência (eixo X), expressa em ciclos por dia, que indica a periodicidade das oscilações. O gráfico evidencia a frequência fundamental do astro, realçada pela concentração de pontos vermelhos que denotam as ocorrências registradas pela sonda Kepler, atribuindo assim relevância estatística ao pico principal.

No exoplaneta 296e, observa-se uma dupla adjacência de picos espectrais com frequências e magnitudes análogas. Ambas as transformadas de Fourier

revelaram, portanto, resultados significativos e congruentes para a pesquisa, exibindo características mensuradas praticamente equivalentes.

Na sequência, analisaram-se os candidatos a exoplanetas em estudo, representados pelas transformadas de Fourier das estrelas 4252322 e 7630229. A primeira exibe uma frequência primordial associada a uma potência espectral elevada, enquanto a segunda apresenta uma frequência ligeiramente superior, porém com amplitude espectral consideravelmente inferior. Conclui-se que a estrela 7630229 orbita com maior frequência, indicando uma velocidade orbital superior à da estrela 4252322 na região analisada.

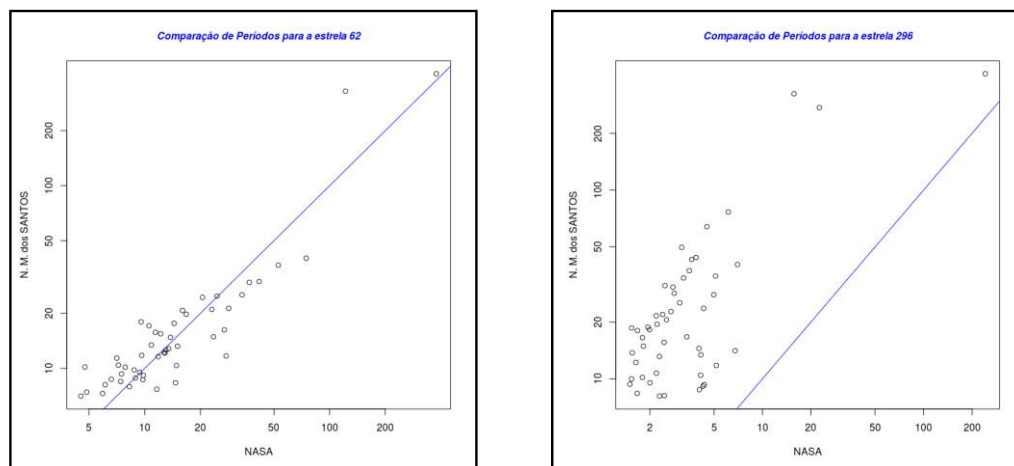
3.2. COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

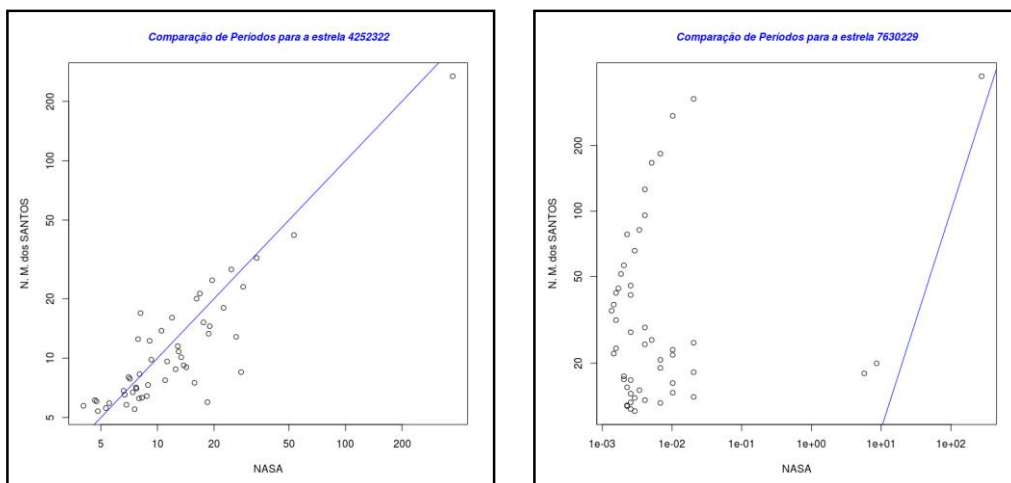
A fim de comparar os períodos calculados neste estudo com os valores de referência da NASA, evidenciando a proximidade entre ambos, foram construídos diagramas que relacionam os períodos obtidos àqueles divulgados pela agência, considerando as quatro curvas de luz analisadas.

Cada gráfico inclui uma reta que indica a correspondência ideal entre os conjuntos de dados. Nota-se que, em parte dos casos, os pontos distribuem-se satisfatoriamente ao longo dessa linha, refletindo forte concordância. Nos demais, embora os valores sistematicamente superem os de referência, mantêm uma tendência linear compatível.

Entre as estrelas com confirmação prévia, os períodos de uma assemelham-se significativamente aos da NASA, enquanto os da outra afastam-se de forma considerável. Devido ao êxito parcial, optou-se por incluir também as curvas de luz não validadas. Para essas, identificou-se que os períodos de uma estrela aproximam-se dos valores de referência, ao passo que os da outra divergem.

Figura 5: Comparação dos períodos com resultados da NASA.





Fonte: Autores (2019).

De modo geral, os cálculos realizados mostram-se próximos aos padrões da NASA, com os períodos mais longos exibindo notável similaridade. Ademais, duas estrelas – uma confirmada e outra não confirmada – apresentaram os resultados mais alinhados com a referência externa.

As discrepâncias observadas podem ser atribuídas a fatores metodológicos, como técnicas distintas de determinação de períodos ou diferentes tratamentos aplicados às curvas de luz, ainda que ambas as abordagens fundamentem-se na Transformada de Fourier. Alternativamente, podem decorrer de variáveis não identificadas no escopo desta investigação.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho evidenciou a aplicabilidade da Transformada de Fourier na análise das curvas de luz obtidas pela missão Kepler, contribuindo para a detecção indireta de exoplanetas. As análises mostraram consonância parcial com os dados da NASA, ressaltando tanto o potencial quanto os limites do método empregado.

A pesquisa reforça a relevância da utilização de ferramentas matemáticas e computacionais na astronomia contemporânea, indicando a necessidade de novos estudos com bases de dados ampliadas e metodologias complementares.

REFERÊNCIAS

BARCLAY, Thomas et al. The five planets in the Kepler-296 binary system all orbit the primary: A statistical and analytical analysis. *The Astrophysical Journal*, v. 809, n. 1, p. 7, 2015.

BARROSO, Renato Rodrigues; OLIVEIRA, Alexandre Lopes de; JESUS, Vitor Luiz de. Simulação da detecção de exoplanetas pelo método do trânsito utilizando o pêndulo cônico e o smartphone. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 42, p. e20200161, 2020.

BATISTA, Peterson de Oliveira. Localização de faltas monofásicas em linhas de transmissão: comparações entre transformada de Fourier e transformada wavelet. 2025.

BORGES, Cindy Lisiani Sales; RODRIGUES, Clóves Gonçalves. Astronomia: breve história, principais conceitos e campos de atuação. *Brazilian Applied Science Review*, v. 6, n. 2, p. 545-577, 2022.

BORUCKI, William J. et al. Kepler-62: a five-planet system with planets of 1.4 and 1.6 Earth radii in the habitable zone. *Science*, v. 340, n. 6132, p. 587-590, 2013.

BORUCKI, William J. et al. Kepler planet-detection mission: introduction and first results. *Science*, v. 327, n. 5968, p. 977-980, 2010.

BRENNAN, Pat. O que no mundo é um 'Exoplanet'? NASA, 2018. Disponível em: <https://www.nasa.gov/feature/jpl/what-in-the-world-is-an-exoplanet>. Acesso em: 25 ago. 2025.

CABRERA, Gelacio Castillo; VILLANUEVA, Martha Patricia Jiménez; GARCÍA, Maribel Aragón. Estudio gráfico de la Transformada de Fourier. *Revista Iberoamericana de Producción Académica y Gestión Educativa*, v. 12, n. 23, p. 24-47, 2025.

CASTRILLÓN, Jenny Paola Bravo. Corot light curves analysis using different comparative processes: estimating stellar rotation periods. 2010. 79 f. Dissertação (Mestrado em Física) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.

CRISPIM, J. T. M.; BRITO, A. C. Caracterização Orbital Via Método de Trânsito Planetário de Candidatos a Exoplanetas da Missão TESS. *Jornal Mato-Grossense de Física (JMFis)*, v. 3, p. 67-77, 2023.

DES ETANGS, A. Lecavelier; LISSAUER, Jack J. The IAU working definition of an exoplanet. *New Astronomy Reviews*, v. 94, p. 101641, 2022.

DUNBAR, Brian. Visão geral da missão. [S. l.]: NASA, 2018. Disponível em: https://www.nasa.gov/mission_pages/kepler/overview/index.html. Acesso em: 20 ago. 2025.

KREYSZIG, Erwin. Matemática superior para engenharia. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

LORENZANA, César Vázquez. Transformada de Fourier. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México, 2022.

MONTEIRO, Guilherme Augusto Dias. Aplicação do Date Compensate Discrete Fourier Transform e do Minimum String Length na determinação de períodos orbitais de binárias eclipsantes com Anãs M. 2018. 95 f. Dissertação (Mestrado em Física) - Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018.

NANGINO, Gabriela. A busca por exoplanetas habitáveis. O Clube do Jornalismo, [S. l.], 2025. Disponível em: <https://oclubedojornalismo.com.br/a-busca-por-exoplanetas-habitaveis/>. Acesso em: 25 ago. 2025.

NASA SCIENCE. Kepler / K2. [S. l.], 2025. Disponível em: <https://science.nasa.gov/mission/kepler/>. Acesso em: 25 ago. 2025.

NASA SCIENCE. Kepler-296. [S. l.], 2014. Disponível em: <https://science.nasa.gov/exoplanet-catalog/kepler-296-c/>. Acesso em: 30 set. 2025.

NASA SCIENCE. Kepler-62 and the Solar System. [S. l.], 2013. Disponível em: <https://science.nasa.gov/resource/kepler-62-and-the-solar-system/>. Acesso em: 30 set. 2025.

NASA SCIENCE. Types of Exoplanets. [S. l.], 2025. Disponível em: <https://exoplanets.nasa.gov/what-is-an-exoplanet/types-of-exoplanets/>. Acesso em: 25 ago. 2025.

NUNES, Willian Ricardo Bispo Murbak et al. Aprendizagem da transformada de Fourier por meio da análise do canto de pássaros locais: um estudo de caso. Revista Iberoamericana de Tecnología en Educación y Educación en Tecnología, n. 41, p. e10-e10, 2025.

PERRIMAN, A.; SACKETT, P. D. Light curve analysis in the study of exoplanetary systems. Annual Review of Astronomy and Astrophysics, v. 57, p. 465-502, 2019.

SAAD OLIVEIRA, Ximena Beatriz. Detecção de planetas nos dados do Kepler. 2019.

SANTOS, Wyler Cordeiro dos; AMORIM, Ronni Geraldo Gomes de. Descobertas de exoplanetas pelo método do trânsito. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 39, p. e2308, 2017.

SARAIVA, Maria de Fátima Oliveira. Astronomia & Astrofísica. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2004.

SEAGER, S.; MALLÉN-ORNELAS, G. A unique solution of planet and star parameters from an extrasolar planet transit light curve. The Astrophysical Journal, v. 585, n. 2, p. 1038-1055, 2003.

SOUZA, Alexandre Araujo de; VALIO, Adriana. Estudo da atividade estelar da Kepler-289 a partir da modelagem de trânsitos planetários. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 41, p. e20180323, 2019.

WICKHAM, Hadley et al. R for data science. Sebastopol: O'Reilly, 2017.

WILL, Dunham. Cientistas encontram a mais forte evidência de vida em planeta alienígena. CNN Brasil, [S. l.], 2025. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/tecnologia/cientistas-encontram-a-mais-forte-evidencia-de-vida-em-planeta-alienigena/>. Acesso em: 25 ago. 2025.



CAPÍTULO 13

DOI: 10.63951/synapse978-65-88890-61-5_13

MARIA EDUARDA DE OLIVEIRA CRUZ^{1,2}

THALITA QUEIROZ E SILVA^{1,2}

EVA LÚCIA CARDOSO SILVEIRA³

LÍLIA BASÍLIO DE CALAND²

MÉTODOS DE PURIFICAÇÃO DO SEBO BOVINO PARA OBTENÇÃO DE BIODIESEL

Resumo

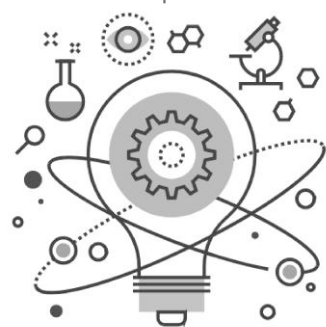
O sebo bovino, utilizado como matéria-prima na produção de biodiesel, representa uma alternativa sustentável para o aproveitamento de um resíduo potencialmente poluente. Apesar de sua elevada disponibilidade e potencial energético, a gordura animal apresenta coloração intensa e alto índice de acidez, fatores que comprometem a obtenção de um biodiesel de boa qualidade. Este estudo teve como objetivo desenvolver materiais e métodos de purificação do sebo bovino, empregando adsorventes de baixo custo, como areia de praia e cascas de abacaxi, além de adsorventes naturais e sintéticos, como óxido de cálcio obtido de conchas calcinadas e cascas de ovo, bem como óxido de cálcio comercial e sílica gel. O processo de purificação foi conduzido por meio de tratamento químico, visando à clarificação do sebo e à remoção de ácidos graxos livres. A caracterização do sebo purificado incluiu análises de coloração, índice de acidez e índice de saponificação, enquanto a síntese do biodiesel foi realizada por transesterificação. Os resultados indicaram que os adsorventes naturais e sintéticos foram eficazes na remoção de pigmentos indesejáveis, promovendo uma redução de 85,7% na acidez. No entanto, o rendimento do biodiesel permaneceu inferior a 80%, sugerindo que, embora a purificação tenha sido eficiente na redução da acidez, não foi suficiente para garantir uma transesterificação totalmente eficiente.

Palavras-chave: adsorventes; purificação do sebo bovino; índice de acidez; biodiesel.

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Norte

² Universidade do Estado do Rio Grande do Norte

³ Universidade Federal de Mato Grosso



Abstract

Beef tallow, used as a raw material in biodiesel production, represents a sustainable alternative for the utilization of a potentially polluting residue. Despite its high availability and energetic potential, animal fat presents intense coloration and a high acid value, which compromise the production of high-quality biodiesel. This study aimed to develop materials and purification methods for beef tallow using low-cost adsorbents such as beach sand and pineapple peels, as well as natural and synthetic adsorbents, including calcium oxide obtained from calcined shells and eggshells, commercial calcium oxide, and silica gel. The purification process was carried out through chemical treatment to improve clarification and remove free fatty acids. The purified tallow was characterized by color, acid value, and saponification index analyses, while biodiesel synthesis was performed via transesterification. The results indicated that the natural and synthetic adsorbents were effective in removing undesirable pigments, achieving an 85.7% reduction in acidity. However, the biodiesel yield remained below 80%, suggesting that, although purification was efficient in reducing acidity, it was not sufficient to ensure a fully efficient transesterification process.

Keywords: adsorbents; beef tallow purification; acid value; biodiesel.

INTRODUÇÃO

A elevada dependência mundial de combustíveis fósseis, como carvão, petróleo e gás natural, tem provocado sérios impactos ambientais e sociais, devido à emissão de gases poluentes e ao esgotamento desses recursos não renováveis. Nesse contexto, fontes de energia renováveis tornam-se essenciais por contribuírem para a redução das emissões e para o desenvolvimento sustentável. Entre elas, os biocombustíveis se destacam por sua origem renovável e baixa emissão de poluentes, alinhando a demanda energética à proteção ambiental. O biodiesel surge como uma alternativa promissora ao diesel de petróleo, por ser limpo, renovável e obtido por diversos tipos de matérias-primas, como óleos vegetais, gorduras animais e óleos residuais, sendo a transesterificação o principal método de produção (Varão *et al.*, 2017). O uso do sebo bovino, embora considerado resíduo industrial, oferece benefícios ambientais, ao destinar corretamente um resíduo poluente (Cunha Jr. *et al.*, 2013), e econômicos, ao reduzir custos de produção e tornar o biodiesel mais competitivo frente ao diesel fóssil (Varão *et al.*, 2017). Apesar da grande potencialidade do uso do sebo bovino como matéria-prima, existem alguns obstáculos no seu processamento que acometem diretamente a produção e comercialização do biodiesel. Uma das dificuldades que se podem mencionar são as impurezas, que interferem nos processos de purificação da gordura animal, de separação e purificação do biodiesel e, também, diminuem o rendimento do processo.

Dentre essas impurezas, o sebo bovino apresenta desvantagem no que diz respeito à presença de carotenóides, em especial o betacaroteno, principal cromóforo encontrado na sua composição. Esse composto é caracterizado pelos pigmentos indesejáveis que acentuam a coloração dessa gordura animal.

Os carotenóides são facilmente a principal fonte das cores amarelo/vermelho em gordura animal, com coloração sendo muito afetada pela dieta do gado e consequentemente variando de acordo com a estação e localidade. Mais de 70 variedades de carotenóides são reconhecidas. Como uma classe, eles são constituídos de unidades de isoprenos e contém formações tanto cíclicas como acíclicas (Patterson, 1992, p.8).

Outro fator negativo é a elevada quantidade de ácidos graxos livres presentes no sebo bovino, fator que influencia no alto índice de acidez, no rendimento da reação e no produto de boa qualidade. Além disso, outra inconveniência é a presença da metilamina ($\text{CH}_3\text{-NH}_2$), composto químico proveniente de certas proteínas da carne, responsável pelo odor característico do sebo.

Diante dessa problemática, é necessário purificar o sebo bovino com a finalidade de aumentar o grau de clarificação e remover os ácidos graxos livres que

causam a acidez elevada. A etapa de purificação foi realizada através de um processo de adsorção utilizando adsorventes naturais e sintéticos, com o propósito de melhorar a qualidade do sebo e obter o biodiesel dentro dos parâmetros físico-químicos especificados pela Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP).

A fim de produzir um combustível renovável e menos poluente utilizando como insumo uma matéria-prima de baixo custo de comercialização, o objetivo geral do respectivo trabalho consistiu em desenvolver materiais e métodos de purificar o sebo bovino para produção sustentável de biodiesel.

Diante do exposto, este trabalho tem como objetivo geral obter biodiesel a partir do sebo bovino, utilizando materiais e métodos desenvolvidos para otimizar a qualidade do produto final. Para alcançar esse propósito, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos: (1) preparar bioclarificantes visando à redução da coloração intensa do sebo bovino; (2) preparar bioadsorventes para diminuir sua acidez; (3) analisar e comparar os diferentes bioclarificantes e bioadsorventes obtidos com adsorventes naturais e sintéticos; (4) determinar os parâmetros do sebo bovino referentes à coloração, índice de acidez e índice de saponificação; (5) obter o biodiesel de sebo empregando os melhores materiais e métodos desenvolvidos; e (6) caracterizar físico-quimicamente o biodiesel produzido conforme os parâmetros especificados pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP).

2. PRODUÇÃO DE BIODIESEL UTILIZANDO SEBO BOVINO PURIFICADO COM ADSORVENTES NATURAIS E SINTÉTICOS

Esta seção aborda os principais conceitos relacionados à produção de biodiesel a partir do sebo bovino purificado, destacando a definição e as propriedades do biodiesel e do sebo, bem como os métodos de purificação utilizados para obtenção de um combustível com qualidade conforme os padrões da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP).

2.1 BIODIESEL

O crescente consumo de combustíveis fósseis e seus impactos ambientais impulsionam a busca por fontes alternativas e renováveis de energia. Nesse contexto, o biodiesel se apresenta como uma alternativa viável e sustentável aos combustíveis derivados do petróleo. De acordo com a Lei Federal nº 11.097/2005, o biodiesel é definido como “biocombustível derivado de biomassa renovável para uso em motores

a combustão interna com ignição por compressão [...] que possa substituir parcial ou totalmente combustíveis de origem fóssil” (Brasil, 2005).

Geralmente, o biodiesel é produzido por transesterificação, reação entre triglicerídeos e um álcool de cadeia curta, na presença de um catalisador, gerando ésteres monoalquílicos (biodiesel) e glicerina como subproduto. Esse combustível destaca-se por ser biodegradável, praticamente isento de enxofre e compostos aromáticos, além de emitir menores quantidades de gases poluentes, reduzindo a dependência de fontes fósseis.

2.1.1 Matéria-Prima

A escolha da matéria-prima para produção de biodiesel deve considerar aspectos econômicos, ambientais e regionais. O biodiesel pode ser obtido a partir de óleos vegetais (soja, algodão, mamona, pinhão-mansão, canola e girassol), gorduras animais (como o sebo bovino) e óleos residuais (óleo de fritura).

2.2 SEBO BOVINO: ASPECTOS GERAIS

O sebo bovino, anteriormente tratado como resíduo, passou a ser valorizado como fonte para a produção de energia limpa, reduzindo o descarte inadequado e a dependência de combustíveis fósseis (Uribe *et al.*, 2014 apud Martins *et al.*, 2011). Além de sua aplicação na produção de biodiesel, seus subprodutos são amplamente utilizados nas indústrias de cosméticos, higiene, limpeza, farmacêutica e alimentícia.

O uso do sebo bovino no mercado de biocombustíveis contribui para o aproveitamento de um resíduo poluente, reduz a competição com culturas alimentares, e apresenta baixo custo de produção em comparação ao óleo de soja, além de maior estabilidade de oferta e elevado rendimento na conversão em biodiesel.

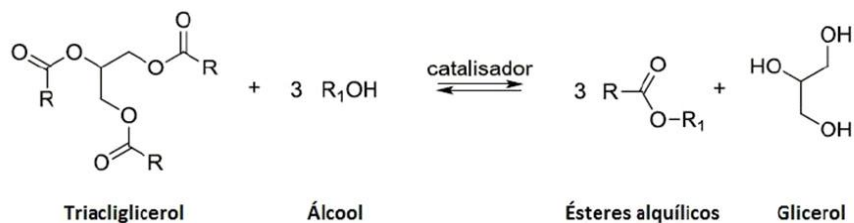
2.3 PURIFICAÇÃO DO SEBO BOVINO

A purificação do sebo é uma etapa essencial para assegurar a qualidade do biodiesel, atendendo aos padrões físico-químicos exigidos pela ANP. Neste trabalho, a purificação foi realizada por meio de adsorção, utilizando adsorventes naturais e sintéticos para reduzir impurezas e melhorar propriedades como acidez e coloração, garantindo um produto final com maior rendimento e qualidade.

2.6 SÍNTESE DO BIODIESEL

O biodiesel pode ser obtido por meio da reação de óleos e/ou gorduras vegetais, animais ou residuais com um álcool na presença de um sistema catalítico. Neste trabalho, o método utilizado para a síntese do biodiesel é o da transesterificação, como mostrado na Figura 1.

Figura 1 - Reação de Transesterificação de Triglicerídeos



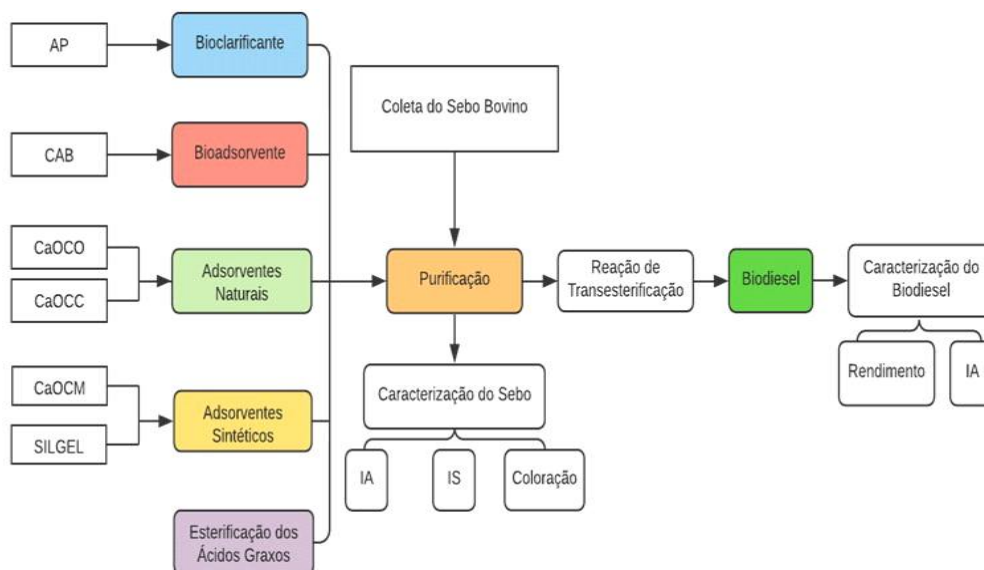
Fonte: RAMOS et al. (2011).

A produção de biodiesel ocorre por meio da reação de transesterificação, na qual triglicerídeos presentes nas matérias-primas reagem com um álcool de cadeia curta na presença de um catalisador, resultando na formação de ésteres monoalquílicos (biodiesel) e glicerol como subproduto (Figura 1). Neste estudo, utilizou-se álcool metílico como agente alcoólico e metóxido de sódio como catalisador básico, visando favorecer a conversão dos triglicerídeos em biodiesel com maior rendimento e pureza.

3. METODOLOGIA

Para atender o objetivo proposto, a metodologia desenvolvida neste trabalho pode ser explicitada no fluxograma (Figura 2) que mostra a etapa de obtenção dos adsorventes utilizados para a purificação; a etapa de purificação do sebo bovino; a etapa de caracterização do sebo bovino purificado quanto ao índice de acidez (IA), índice de saponificação (IS) e coloração; a etapa da síntese do biodiesel e caracterização quanto ao índice de acidez (IA) e rendimento da reação. Todos os procedimentos experimentais foram realizados no Laboratório de Farmácia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) e no Laboratório do INDAMA.

Figura 2 – Fluxograma Geral da Metodologia dos Procedimentos Experimentais



Fonte: Autores (2021).

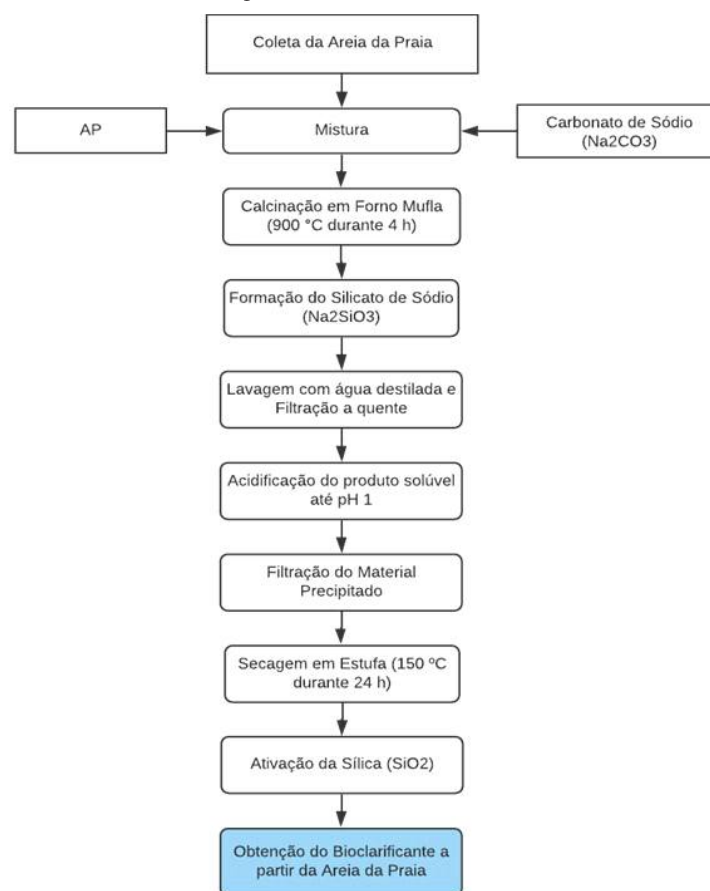
3.1 OBTENÇÃO DOS ADSORVENTES NATURAIS

Para a etapa de purificação, o sebo bovino foi purificado empregando adsorventes naturais e sintéticos. Com a finalidade de obter uma metodologia de purificação mais econômica, foi proposto a utilização de adsorventes de baixo custo com o propósito de baratear esse processo.

Diante disso, foram desenvolvidos adsorventes oriundos de fontes naturais como a areia da praia (AP) e de resíduos agrícolas como as cascas de abacaxi (CAB). Esses adsorventes foram utilizados para produzir o bioclarificante e o bioadsorvente, respectivamente. Para fins de comparação, foram utilizados adsorventes sintéticos como o óxido de cálcio comercial (CaOCM) e a sílica gel (SILGEL), e adsorventes naturais, como o óxido de cálcio obtido a partir da calcinação de conchas marinhas (CaOCC) e das cascas de ovo (CaOCO), ambos os materiais produzidos por nosso grupo de pesquisa.

A etapa de purificação do sebo ajuda a melhorar a qualidade de produção do biodiesel e torná-lo competitivo em preço com o diesel de petróleo, atraindo a atenção de produtores de biodiesel. A metodologia desenvolvida para obter o bioclarificante a partir da areia da praia pode ser explicitada no fluxograma da Figura 3.

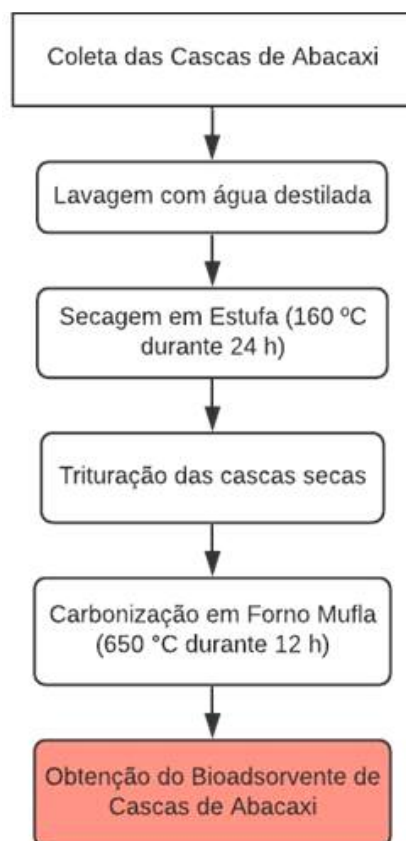
Figura 3 – Fluxograma da Metodologia para Obtenção do Bioclarificante a partir da Areia da Praia.



Fonte: Autores (2021).

Na preparação do bioadsorvente empregando cascas de abacaxi foi desenvolvida a metodologia explicitada no fluxograma da Figura 4.

Figura 4 – Fluxograma da Metodologia utilizada na Preparação do Bioadsorvente empregando Cascas de Abacaxi.



Fonte: Autores (2021).

3.2 PURIFICAÇÃO DO SEBO BOVINO

Na purificação da matéria-prima, o sebo bovino primeiramente foi aquecido no banho-maria a 60 °C e, em seguida, submetido a uma etapa de filtração de modo a eliminar as impurezas sólidas presentes na sua composição. Posteriormente, a gordura animal recebeu um tratamento químico por meio do processo de adsorção utilizando diferentes metodologias empregando o bioclarificante, o bioadsorvente e os adsorventes naturais e sintéticos para reduzir o índice de acidez e aumentar o grau de clarificação do sebo bovino. Também foi realizado o processo de esterificação dos ácidos graxos a fim de diminuir o índice de acidez, evitar a formação de sabões e aumentar o rendimento da reação.

3.3 CARACTERIZAÇÃO DO SEBO BOVINO

Depois de submetido ao processo de purificação, a gordura animal foi caracterizada quanto a sua coloração, índice de acidez e índice de saponificação.

3.3.1 Índice de acidez

O índice de acidez (IA) é um parâmetro aplicável no controle de qualidade a todos os óleos vegetais brutos e refinados, óleos marinhos e gorduras animais. O valor ácido é dado por miligramas de hidróxido de sódio necessários para neutralizar os ácidos graxos livres presentes em 1 grama da amostra.

3.3.2 Índice de Saponificação

O índice de saponificação (IS) é aplicável a todos os óleos e gorduras. O valor representa a massa (em miligramas) de hidróxido de potássio necessária para saponificar 1 g da amostra da gordura animal. Esse parâmetro foi determinado de acordo com as normas do Instituto Adolfo Lutz (1985).

3.4 SÍNTESE DO BIODIESEL

A síntese do biodiesel de sebo bovino foi realizada a partir da reação de transesterificação em duas etapas, segundo o procedimento proposto por Boog *et al.* (2011) e Caland *et al.* (2009, 2012). Na primeira etapa, foram adicionados 16 % (m/m) de metanol e 0,56 % (m/m) de catalisador (metóxido de sódio 30 % m/m), calculados em relação à massa do sebo bovino.

A reação ocorreu com um auxílio de um balão de fundo redondo, no qual foi adicionado o sebo, o metanol e o catalisador. O sistema foi aquecido à temperatura de aproximadamente $60\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 1h, sob refluxo. Após a primeira etapa da reação, os produtos obtidos foram colocados em um funil de decantação para separar os ésteres (fase menos densa) do glicerol.

A fase inferior, que é a mistura do sebo não-transesterificado e glicerina, foi retirada. Os ésteres (fase superior) foram novamente submetidos à reação com adição de 4% (m/m) de metanol e 0,14% (m/m) do catalisador, ambas as porcentagens foram calculadas em relação à massa do sebo bovino. A reação também ocorreu a $60 \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ por mais 1h, sob refluxo. Depois de ter realizado a segunda etapa, os produtos foram colocados em um funil de decantação para separar a glicerina.

Após outra decantação, a fase superior foi lavada com porções de água destilada para remoção das impurezas (metanol, catalisador e glicerina residual). Em seguida, o biodiesel produzido foi submetido a aquecimento em uma temperatura de $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ por 1 hora para completar o processo de secagem e a eliminação do álcool residual.

3.5 CARACTERIZAÇÃO DO BIODIESEL

Para atender aos parâmetros especificados pela ANP, foi realizada a caracterização do biodiesel a fim de determinar algumas propriedades físico-químicas como os parâmetros de rendimento e o índice de ácidos graxos livres na sua composição.

Para calcular o rendimento mássico do biodiesel, foi necessário realizar a pesagem da amostra. Em seguida, foi feito o cálculo de acordo com a Equação 1.

$$\text{Rendimento} = \frac{\text{Peso do biodiesel obtido (g)}}{\text{Peso do sebo (g)}} \times 100 \quad \text{Equação 1}$$

O índice de acidez das amostras foi calculado de acordo com a Equação 2:

$$\text{Índice de Acidez} = \frac{(A-B) \times C \times 40}{M} \text{ mg NaOH/g} \quad \text{Equação 2}$$

A é o volume, em mililitros, de solução titulante usado para titular uma amostra;

B é o volume de titulante para a titulação do branco, em mililitros;

C é a concentração de solução titulante, em mol por litro;

M é a massa da amostra, em gramas.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, são apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir da purificação do sebo bovino utilizando adsorventes naturais e sintéticos. As amostras purificadas foram submetidas a caracterizações físico-químicas, com ênfase nos parâmetros de coloração, índice de acidez e índice de saponificação. Para o biodiesel sintetizado, avaliaram-se o rendimento da reação de transesterificação e o índice de acidez do produto, com o intuito de verificar a eficiência dos processos de purificação e produção.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO SEBO BOVINO PURIFICADO COM ADSORVENTES NATURAIS E SINTÉTICOS

A caracterização das amostras de sebo bovino após o processo de purificação permitiu identificar quais adsorventes utilizados foram mais eficazes no aumento do grau de clarificação, bem como na remoção dos ácidos graxos livres presentes na gordura animal.

4.1.1 Aspecto

Ao executar a metodologia recomendada para a obtenção do bioclarificante a partir da areia da praia, foi observado que na acidificação do silicato de sódio não houve a formação do material precipitado (sílica) em meio ácido. Este processo de acidificação consistiu na mistura de 25 mL da solução de HCl com o produto solúvel resultante após a filtração a quente (silicato de sódio).

Foi adicionado ao silicato de sódio aproximadamente mais 30 mL de HCl concentrado para que houvesse a formação da sílica, porém esta só foi formada em

meio básico com pH 12 (Figura 5). Desta forma, conclui-se que a formação do material precipitado contrariou o que afirma a literatura de que a sílica precipita em meio ácido até obter pH 1 (Prado *et al.*, 2005; Aksu, 2001).

Figura 5 – Formação da sílica utilizada como bioclarificante

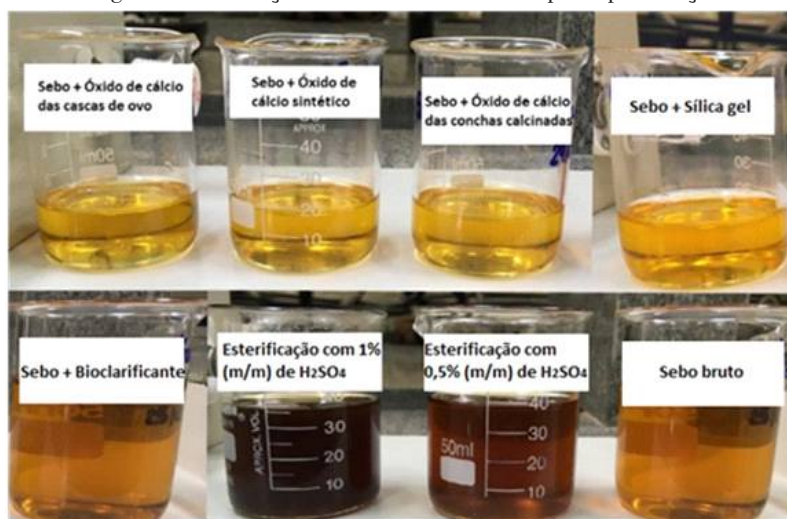


Fonte: Autores (2021).

A elevada quantidade de carotenóides na composição do sebo bovino, em especial o betacaroteno, interfere diretamente na coloração acentuada da gordura animal. Para isso, o sebo bovino passou pelo processo de purificação utilizando adsorventes naturais e sintéticos, com a finalidade de eliminar os pigmentos indesejáveis, aumentar o grau de clarificação e agregar valor as amostras de sebo purificado quando comparado com o sebo bruto.

Os resultados mostraram que o sebo bovino purificado com o bioclarificante obtido a partir da areia apresentou aspecto turbido e não foi capaz de eliminar os pigmentos indesejáveis na sua coloração. Também observou-se que não foi possível clarificar o sebo bovino após realizar a esterificação dos ácidos graxos com 0,5% e 1% (m/m) de ácido sulfúrico (Figura 6).

Figura 6 – Coloração das amostras de sebo após a purificação



Fonte: Autores (2021).

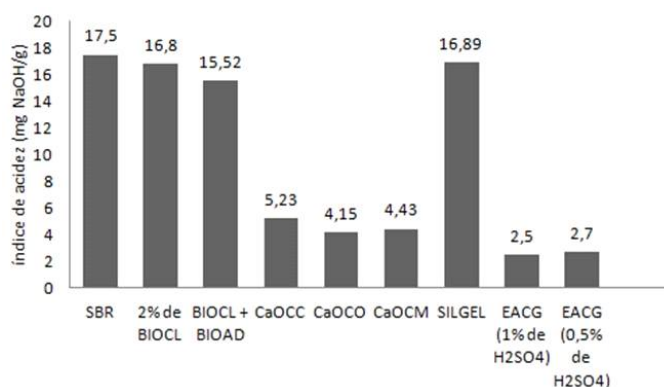
Na Figura 6, observa-se que dentre todos os materiais desenvolvidos, somente as amostras de sebo bovino purificado com a sílica gel e o óxido de cálcio quando utilizado, na forma natural e sintética, mostraram resultados satisfatórios quanto à eliminação dos pigmentos e aumento no grau de clarificação. O aspecto das amostras de sebo desses materiais foi límpido quando comparadas com o sebo bruto e as amostras com a esterificação dos ácidos graxos. As principais substâncias removidas durante a etapa de clarificação foram os pigmentos (carotenóides), sabão e radicais livres que causam a oxidação.

4.1.2 Índice de Acidez

A determinação do índice de acidez (IA) é um parâmetro de qualidade que está relacionado com a concentração de ácidos graxos livres presentes na gordura animal. A elevada quantidade de ácidos graxos livres interfere diretamente no processo de purificação do sebo bovino, dificulta a reação de produção do biodiesel e diminui seu rendimento. A taxa de acidez elevada dessa gordura animal é a indicação de que o material graxo está sofrendo quebra na cadeia dos gliceróis liberando ácidos graxos livres. Desta forma, é bastante importante a determinação do índice de acidez de materiais graxos para identificar se o biodiesel produzido tem uma boa qualidade.

Segundo a Resolução da Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (RANP), nº 45/2014, o limite máximo do índice de acidez do sebo bovino é de 0,5 mg NaOH/g. Os valores do índice de acidez encontrado no sebo bovino bruto e nas amostras de sebo purificado com os diferentes adsorventes desenvolvidos são mostrados no Gráfico 1.

Gráfico 1 - Índice de acidez das amostras de sebo purificado



Fonte: Autores (2021).

No Gráfico 1, observa-se que o IA do sebo bovino bruto (SBR) calculado neste trabalho foi de 17,5 mg NaOH/g. Os valores revelados indicaram que o IA variou entre 2,5 – 16,89 mg NaOH/g para as amostras com o sebo bovino purificado com os adsorventes naturais e sintéticos e pela etapa de esterificação ácida. Sendo assim, considerando as especificações da Resolução ANP, nº 45/2014, todos os resultados obtidos apresentaram taxas de acidez acima do valor máximo de 0,5 mg NaOH/g.

Observou-se que os valores encontrados para o sebo purificado indicaram que o IA das amostras sofreu reduções entre 3,5 e 85,7% em relação ao valor revelado para o sebo bruto (SBR). Desta forma, os resultados demonstraram que o tratamento de purificação do sebo bovino com alguns adsorventes utilizados induziu na redução do índice de acidez.

No processo de EACG utilizando 1% de ácido sulfúrico, o valor do IA foi de 2,5 mg de NaOH/g, enquanto que ao utilizar 0,5% de ácido sulfúrico foi 2,7 mg de NaOH/g. Nas amostras de sebo bovino purificado com o óxido de cálcio utilizando materiais naturais e sintéticos foi revelado o IA de 5,23 mg de NaOH/g para o óxido de cálcio obtido a partir das conchas calcinadas (CaOCC), o IA de 4,15 mg de NaOH/g para óxido de cálcio obtido das cascas de ovo (CaOCO) e o IA de 4,43 para o óxido de cálcio comercial (CaOCM). Desta forma, conclui-se que as amostras que apresentaram os melhores resultados foram as que utilizaram o óxido de cálcio obtido na forma sintética e natural e o processo de esterificação dos ácidos graxos nos diferentes níveis, embora este último revelasse os menores valores ácidos.

O sebo bovino purificado com a sílica gel foi o que obteve o maior valor ácido, 16,89 mg de NaOH/g. É importante destacar que todas as amostras de sebo purificado com o bioclarificante, obtido a partir da areia da praia e o bioadsorvente obtido das cascas de abacaxi, demonstraram que não foram eficazes para reduzir a acidez e aumentar o grau de clarificação do sebo. Sendo assim, contrariando o que espera a metodologia descrita neste trabalho.

Para fins de comparação, foram analisados alguns estudos que também utilizaram adsorventes naturais e sintéticos e o processo de esterificação ácida. Alguns estudos utilizaram resíduos agrícolas como adsorventes naturais para purificar a matéria-prima e obter biodiesel com baixo índice de acidez. Segundo a pesquisa de Silva (2020), a purificação do óleo de fritura com cascas de abacaxi resultou em um biodiesel com índice de acidez de 0,0553 mg NaOH/g.

De acordo com o estudo de Vieira *et al.* (2020), as amostras que fizeram o uso do ácido sulfúrico para purificar o sebo bovino apresentaram índices de acidez entre 2,76 – 3,02 mg KOH/g e índices de saponificação entre 156 – 159 mg KOH/g. Segundo o estudo de Silva *et al.* (2015), foi possível observar que o processo de esterificação ácida foi eficiente na diminuição do índice de acidez da gordura de frango. O sebo esterificado obteve valor de 1,7 mg KOH/g para o índice de acidez e, para o índice de saponificação, 201,9 mg KOH/g. No estudo de Alves *et al.* (2014) foi realizada a etapa da esterificação ácida no óleo residual e no óleo de soja. O IA do óleo residual foi de 0,5453 mg KOH/g e para o óleo de soja foi de 0,04062 mg KOH/g.

Existem estudos que utilizam a sílica gel como adsorvente sintético para purificar matérias primas como o óleo de soja refinado e óleos de fritura. Conforme observado por Ferreira (2018), utilizar o óxido de cálcio obtido por calcinação de

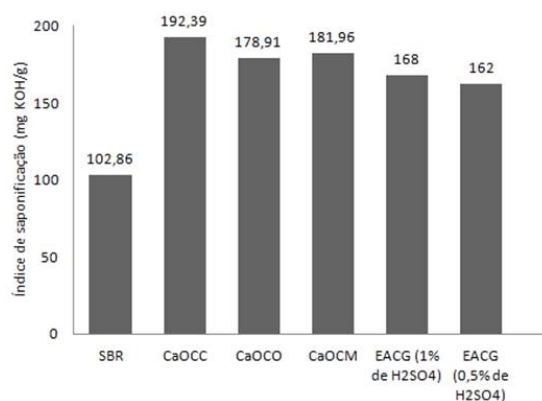
restos alimentares ricos em cálcio (conchas de vieiras) como catalisador e sílica comercial (SIPERNAT® 22) como adsorvente resultou em um biodiesel de óleo de soja com índice de acidez de 0,12 mg KOH/g e biodiesel de óleo de fritura de 0,11 mg KOH/g.

4.1.3 Índice de Saponificação

Nos parâmetros de qualidade para aceitabilidade da gordura animal, é importante que os valores para o índice de saponificação estejam dentro dos limites para que não venham a provocar alterações indesejáveis comprometendo a sua capacidade de utilização.

Referente aos resultados do índice de saponificação (IS), que avalia a proporção da gordura composta por ácidos graxos para formar sabão ao invés de biocombustível, observa-se no Gráfico 2 que apenas a amostra utilizando o óxido de cálcio obtido das conchas calcinadas (CaOCC) estava de acordo com os valores reportados na literatura que é na faixa de 190 a 200 mg KOH/g (Physical and Chemical Characteristics of Oils, Fats, and Waxes – AOCS) (Levy, 2011).

Gráfico 2 - Índice de saponificação das amostras de sebo purificada



Fonte: Autores (2021)

No Gráfico 2, observa-se que o IS do sebo bovino bruto (SBR) calculado neste trabalho foi de 102,86 mg NaOH/g. Os valores revelados indicaram que o IS variou entre 162 – 192,39 mg KOH/g para as amostras de sebo bovino purificado quando o óxido de cálcio foi utilizado, na forma natural e sintética e etapa de esterificação ácida.

Nas amostras de sebo bovino purificado com o óxido de cálcio obtido a partir das conchas calcinadas (CaOCC) o IS foi de 192,39 KOH/g, para o óxido de cálcio obtido das cascas de ovo (CaOCO) o IS foi de 178,91 mg KOH/g e para o óxido de cálcio comercial (CaOCM) o valor do IS foi de 181,96 mg KOH/g. No processo de EACG utilizando 1% de ácido sulfúrico o valor do IS foi de 168 mg de KOH/g, enquanto que ao utilizar 0,5% de ácido sulfúrico foi 162 mg de KOH/g. Desta forma, conclui-se que as amostras não estavam de acordo com os valores que apontam a literatura (190 a 200 mg KOH/g).

4.2 CARACTERIZAÇÃO DO BIODIESEL DE SEBO PURIFICADO

Referente à produção do biodiesel, foi utilizado o sebo bovino purificado com óxido de cálcio obtido das conchas calcinadas (CaOCC). Por ter sido a única amostra analisada que estava dentro do limite máximo do índice de saponificação utilizamo-la. Após realizar as duas etapas da reação de transesterificação, a amostra solidificou e formou uma emulsão estável que não se separou mesmo sendo submetida ao processo de decantação (Figura 7). Essa amostra de biodiesel obteve rendimento de 55,24 % e índice de acidez de 4,7 mg NaOH/g.

Figura 7 – Formação da Emulsão após a Transesterificação do Sebo Purificado com CaOCC



Fonte: Autores (2021).

Para a ANP, o biodiesel deve ter um rendimento igual ou superior a 80%. A norma Europeia EN 14214, dos EUA ASTM D6751 e a Brasileira ANP 07/2008 estabelecem um valor limite de 0,5 mg de NaOH/g ou KOH/g para o índice de acidez. Dessa forma, a amostra de biodiesel sintetizado apresentou valores para o índice de acidez e rendimento superior ao indicado pela ANP.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A qualidade da matéria-prima é determinante para a eficiência e os custos da produção de biodiesel. Neste trabalho, desenvolveu-se uma metodologia de purificação do sebo bovino empregando adsorventes naturais e sintéticos de baixo custo, com o objetivo de obter um insumo adequado à síntese de biodiesel e aos padrões exigidos pela ANP.

Os processos de bioclarificação e redução da acidez mostraram-se eficazes, com destaque para os adsorventes óxido de cálcio (natural e sintético) e sílica gel, que proporcionaram significativa clarificação e redução da acidez em até 85,7%. As amostras tratadas apresentaram valores de índice de acidez variando entre 2,5 e 16,89 mg NaOH/g, inferiores ao do sebo bruto (17,5 mg NaOH/g), embora ainda acima do limite recomendado pela ANP (0,5 mg NaOH/g).

O índice de saponificação das amostras tratadas com óxido de cálcio de conchas calcinadas (CaOCC) esteve dentro da faixa reportada na literatura (190–200 mg KOH/g). O biodiesel produzido a partir dessa amostra apresentou rendimento inferior a 80% e índice de acidez de 4,7 mg NaOH/g.

Conclui-se que a purificação com os adsorventes estudados melhorou significativamente as propriedades do sebo, embora não tenha sido suficiente para garantir um biodiesel dentro das especificações da ANP. Recomenda-se o aprimoramento dos métodos de purificação e ajustes nas condições reacionais para alcançar melhores resultados de acidez e rendimento.

As melhores reduções de acidez foram obtidas com o uso da esterificação dos ácidos graxos (2,5–2,7 mg NaOH/g), óxido de cálcio natural (4,15–5,23 mg NaOH/g) e óxido de cálcio comercial (4,43 mg NaOH/g), apresentando valores significativamente inferiores ao sebo bruto (17,5 mg NaOH/g). Apenas a amostra tratada com óxido de cálcio proveniente de conchas calcinadas (CaOCC) apresentou índice de saponificação dentro da faixa reportada na literatura (190–200 mg KOH/g).

O biodiesel produzido a partir do sebo purificado com CaOCC apresentou rendimento inferior a 80% e índice de acidez de 4,7 mg NaOH/g, indicando que, embora os adsorventes utilizados tenham promovido boa clarificação e redução de acidez, a reação de transesterificação não atingiu a eficiência necessária para atender às especificações da ANP. Assim, recomenda-se o aprimoramento dos métodos de purificação e ajustes nas condições reacionais para obtenção de um biodiesel com qualidade adequada.

REFERÊNCIAS

- ALVES, C. H. F. et al. Avaliação do índice de acidez de óleos residuais e óleo de soja submetidos à esterificação ácida para produção de biodiesel. *Revista Brasileira de Engenharia Química*, v. 31, n. 2, p. 45-52, 2014.
- BOOG, J. H. F. et al. Produção de biodiesel a partir de sebo bovino utilizando diferentes catalisadores. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 15, n. 3, p. 345-350, 2011.
- BRASIL. Lei n.º 11.097, de 13 de janeiro de 2005. Dispõe sobre a introdução do biodiesel na matriz energética brasileira. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 13 jan. 2005. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2005/Lei/L11097.htm
- CALAND, L. B.; SANTOS, L. S. S.; MOURA, C. V. R.; MOURA, E. M. Preparation and study of bimetallic compounds efficiency in the synthesis of biodiesel fuel. *Catalysis Letters*, v. 128, p. 392-400, 2009. Disponível em: https://www.academia.edu/23733068/Preparation_and_Study_of_Bimetallic_Compounds_Efficiency_in_the_Synthesis_of_Biodiesel_Fuel
- CALAND, L. B.; SILVEIRA, E. L. C.; TUBINO, M. Determination of sodium, potassium, calcium and magnesium cations in biodiesel by ion chromatography. *Analytica Chimica Acta*, v. 718, p. 116-120, 9 mar. 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0003267012000037>
- CUNHA JÚNIOR, A.; FEDDERN, V.; DE PRÁ, M. C.; HIGARASHI, M. M.; DE ABREU, P. G.; COLDEBELLA, A. Synthesis and characterization of ethylic biodiesel from animal fat wastes. *Fuel*, v. 105, p. 228-234, mar. 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236112004401>
- INSTITUTO ADOLFO LUTZ (IAL). Normas analíticas do Instituto Adolfo Lutz: métodos químicos e físicos para análise de alimentos. 3. ed. São Paulo: Instituto Adolfo Lutz, 1985.
- MARTINS, P. F. et al. (apud URIBE, 2014). Avaliação do uso de sebo bovino na produção de biodiesel: propriedades e rendimento. *Revista Engenharia Ambiental*, v. 8, n. 1, p. 67-75, 2011.
- PATTERSON, D. S. P. *Biochemistry of animal fats*. London: Elsevier Applied Science, 1992. p. 8.
- RAMOS, L. P. et al. Biodiesel: glicerina e seus coprodutos. *Química Nova*, v. 34, n. 3, p. 421-426, 2011.
- SILVA, A. C. F. Purificação de óleo residual de fritura utilizando cascas de abacaxi como adsorvente natural. *Revista de Energias Renováveis*, v. 9, n. 1, p. 112-120, 2020.
- URIBE, R. A. M.; ALBERCONI, C. H.; TAVARES, B. A. Produção de biodiesel a partir do sebo bovino: viabilidade econômica e métodos de produção. In: *X Congresso Nacional de Excelência em Gestão, 2014. Anais eletrônicos*. Disponível em: https://www.inovarse.org/sites/default/files/T14_0356_16.pdf
- VARÃO, L. H. R.; SILVA, T. A. L.; ZAMORA, H. D. Z.; PASQUINI, D. Vantagens e limitações do sebo bovino enquanto matéria-prima para a indústria brasileira de biodiesel. *HOLOS*, ano 33, v. 7, p. 39-54, 2017. Disponível em: <http://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/download/5010/pdf>
- VIEIRA, F. S. et al. Purificação do sebo bovino por ácido sulfúrico para obtenção de biodiesel com baixo índice de acidez. *Revista Brasileira de Energia Sustentável*, v. 12, n. 3, p. 201-210, 2020.

SOBRE AS ORGANIZADORAS



Compartilhando conhecimento

SOBRE AS ORGANIZADORAS



ANDRÉA JANE DA SILVA

Possui graduação em Letras pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (1998) e mestrado em Estudos da Linguagem pela mesma instituição (2001). É doutora em Educação, na área de formação e profissionalização docente, com pesquisas voltadas para a formação inicial do professor de Língua Portuguesa. Atualmente, é professora Adjunto IV da Universidade do Estado do Rio Grande do Norte (UERN), atuando, na graduação, no Bacharelado em Ciência e Tecnologia e, na pós-graduação *stricto sensu*, no Mestrado Profissional em Letras do Campus Avançado de Assu.

E-mail: andreaiane@uern.br

LÍLIA BASÍLIO DE CALAND

Doutora em Ciências pela Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) e Pós-Doutora pelo Programa de Pós-Graduação em Ciências Farmacêuticas da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). Possui experiência em Tecnologia Farmacêutica, com ênfase em nanotecnologia e métodos quantitativos de análise de medicamentos. Atua na área de Química, com ênfase em Química Analítica, Instrumentação Analítica e Físico-Química. Desenvolve projetos voltados à produção sustentável de biodiesel a partir de matérias-primas alternativas, com foco na purificação de óleos e gorduras residuais, caracterização físico-química e avaliação do desempenho e desgaste de componentes metálicos em motores alimentados com biodiesel. Atualmente, é docente da Universidade do Estado do Rio Grande do Norte (UERN).



E-mail: liliabasilio@uern.br



<https://www.facebook.com/UERN CET/>



<https://www.instagram.com/cetuern/>



<https://www.facebook.com/Synapse-Editora-111777697257115>



<https://www.instagram.com/synapseeditora>



<https://www.linkedin.com/in/synapse-editora-compartilhando-conhecimento/>



31 98264-1586



editorasynapse@gmail.com



Compartilhando conhecimento