

Física:

Universo e os Fenômenos Naturais

Edson Ribeiro de Britto de Almeida Junior
(Organizador)

Atena
Editora

Ano 2021

Física:

O Universo e os Fenômenos Naturais

Edson Ribeiro de Britto de Almeida Junior
(Organizador)

Atena
Editora

Ano 2021

Editora Chefe

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Assistentes Editoriais

Natalia Oliveira

Bruno Oliveira

Flávia Roberta Barão

Bibliotecária

Janaina Ramos

Projeto Gráfico e Diagramação

Natália Sandrini de Azevedo

Camila Alves de Cremo

Luiza Alves Batista

Maria Alice Pinheiro

Imagens da Capa

Shutterstock

Edição de Arte

Luiza Alves Batista

Revisão

Os Autores

2021 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do Texto © 2021 Os autores

Copyright da Edição © 2021 Atena Editora

Direitos para esta edição cedidos à Atena Editora pelos autores.



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

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

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

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

Conselho Editorial

Ciências Humanas e Sociais Aplicadas

Prof. Dr. Alexandre Jose Schumacher – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Paraná

Prof. Dr. Américo Junior Nunes da Silva – Universidade do Estado da Bahia

Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Dr. Antonio Gasparetto Júnior – Instituto Federal do Sudeste de Minas Gerais
Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília
Prof. Dr. Carlos Antonio de Souza Moraes – Universidade Federal Fluminense
Prof. Dr. Crisóstomo Lima do Nascimento – Universidade Federal Fluminense
Prof^ª Dr^ª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa
Prof. Dr. Daniel Richard Sant’Ana – Universidade de Brasília
Prof. Dr. Deyvison de Lima Oliveira – Universidade Federal de Rondônia
Prof^ª Dr^ª Dilma Antunes Silva – Universidade Federal de São Paulo
Prof. Dr. Edvaldo Antunes de Farias – Universidade Estácio de Sá
Prof. Dr. Elson Ferreira Costa – Universidade do Estado do Pará
Prof. Dr. Eloi Martins Senhora – Universidade Federal de Roraima
Prof. Dr. Gustavo Henrique Cepolini Ferreira – Universidade Estadual de Montes Claros
Prof^ª Dr^ª Ivone Goulart Lopes – Instituto Internazionele delle Figlie de Maria Ausiliatrice
Prof. Dr. Jadson Correia de Oliveira – Universidade Católica do Salvador
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense
Prof^ª Dr^ª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins
Prof. Dr. Luis Ricardo Fernandes da Costa – Universidade Estadual de Montes Claros
Prof^ª Dr^ª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Marcelo Pereira da Silva – Pontifícia Universidade Católica de Campinas
Prof^ª Dr^ª Maria Luzia da Silva Santana – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Prof^ª Dr^ª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Prof^ª Dr^ª Rita de Cássia da Silva Oliveira – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Prof. Dr. Rui Maia Diamantino – Universidade Salvador
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará
Prof^ª Dr^ª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande
Prof. Dr. William Cleber Domingues Silva – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

Ciências Agrárias e Multidisciplinar

Prof. Dr. Alexandre Igor Azevedo Pereira – Instituto Federal Goiano
Prof^ª Dr^ª Carla Cristina Bauermann Brasil – Universidade Federal de Santa Maria
Prof. Dr. Antonio Pasqualetto – Pontifícia Universidade Católica de Goiás
Prof. Dr. Cleberton Correia Santos – Universidade Federal da Grande Dourados
Prof^ª Dr^ª Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná
Prof^ª Dr^ª Diocléa Almeida Seabra Silva – Universidade Federal Rural da Amazônia
Prof. Dr. Écio Souza Diniz – Universidade Federal de Viçosa
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Fágner Cavalcante Patrocínio dos Santos – Universidade Federal do Ceará
Prof^ª Dr^ª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Prof. Dr. Jael Soares Batista – Universidade Federal Rural do Semi-Árido
Prof. Dr. Júlio César Ribeiro – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof^ª Dr^ª Lina Raquel Santos Araújo – Universidade Estadual do Ceará
Prof. Dr. Pedro Manuel Villa – Universidade Federal de Viçosa
Prof^ª Dr^ª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará
Prof^ª Dr^ª Talita de Santos Matos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Tiago da Silva Teófilo – Universidade Federal Rural do Semi-Árido

Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfnas

Ciências Biológicas e da Saúde

Prof. Dr. André Ribeiro da Silva – Universidade de Brasília

Prof^ª Dr^ª Anelise Levay Murari – Universidade Federal de Pelotas

Prof. Dr. Benedito Rodrigues da Silva Neto – Universidade Federal de Goiás

Prof^ª Dr^ª Débora Luana Ribeiro Pessoa – Universidade Federal do Maranhão

Prof. Dr. Douglas Siqueira de Almeida Chaves – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

Prof. Dr. Edson da Silva – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri

Prof^ª Dr^ª Elizabeth Cordeiro Fernandes – Faculdade Integrada Medicina

Prof^ª Dr^ª Eleuza Rodrigues Machado – Faculdade Anhanguera de Brasília

Prof^ª Dr^ª Elane Schwinden Prudêncio – Universidade Federal de Santa Catarina

Prof^ª Dr^ª Eysler Gonçalves Maia Brasil – Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira

Prof. Dr. Ferlando Lima Santos – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia

Prof. Dr. Fernando Mendes – Instituto Politécnico de Coimbra – Escola Superior de Saúde de Coimbra

Prof^ª Dr^ª Gabriela Vieira do Amaral – Universidade de Vassouras

Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria

Prof. Dr. Helio Franklin Rodrigues de Almeida – Universidade Federal de Rondônia

Prof^ª Dr^ª Iara Lúcia Tescarollo – Universidade São Francisco

Prof. Dr. Igor Luiz Vieira de Lima Santos – Universidade Federal de Campina Grande

Prof. Dr. Jefferson Thiago Souza – Universidade Estadual do Ceará

Prof. Dr. Jesus Rodrigues Lemos – Universidade Federal do Piauí

Prof. Dr. Jônatas de França Barros – Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Prof. Dr. José Max Barbosa de Oliveira Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará

Prof. Dr. Luís Paulo Souza e Souza – Universidade Federal do Amazonas

Prof^ª Dr^ª Magnólia de Araújo Campos – Universidade Federal de Campina Grande

Prof. Dr. Marcus Fernando da Silva Praxedes – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia

Prof^ª Dr^ª Maria Tatiane Gonçalves Sá – Universidade do Estado do Pará

Prof^ª Dr^ª Mylena Andréa Oliveira Torres – Universidade Ceuma

Prof^ª Dr^ª Natiéli Piovesan – Instituto Federaci do Rio Grande do Norte

Prof. Dr. Paulo Inada – Universidade Estadual de Maringá

Prof. Dr. Rafael Henrique Silva – Hospital Universitário da Universidade Federal da Grande Dourados

Prof^ª Dr^ª Regiane Luz Carvalho – Centro Universitário das Faculdades Associadas de Ensino

Prof^ª Dr^ª Renata Mendes de Freitas – Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof^ª Dr^ª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa

Prof^ª Dr^ª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande

Ciências Exatas e da Terra e Engenharias

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

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

Prof^ª Dr^ª Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná

Prof. Dr. Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Prof. Dr. Douglas Gonçalves da Silva – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia

Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof^ª Dr^ª Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará
Prof^ª Dra. Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho
Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande
Prof^ª Dr^ª Luciana do Nascimento Mendes – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Marcelo Marques – Universidade Estadual de Maringá
Prof. Dr. Marco Aurélio Kistemann Junior – Universidade Federal de Juiz de Fora
Prof^ª Dr^ª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba
Prof^ª Dr^ª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Prof^ª Dr^ª Priscila Tessmer Scaglioni – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

Linguística, Letras e Artes

Prof^ª Dr^ª Adriana Demite Stephani – Universidade Federal do Tocantins
Prof^ª Dr^ª Angeli Rose do Nascimento – Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro
Prof^ª Dr^ª Carolina Fernandes da Silva Mandaji – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof^ª Dr^ª Denise Rocha – Universidade Federal do Ceará
Prof. Dr. Fabiano Tadeu Grazioli – Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná
Prof^ª Dr^ª Keyla Christina Almeida Portela – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Paraná
Prof^ª Dr^ª Miranilde Oliveira Neves – Instituto de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará
Prof^ª Dr^ª Sandra Regina Gardacho Pietrobon – Universidade Estadual do Centro-Oeste
Prof^ª Dr^ª Sheila Marta Carregosa Rocha – Universidade do Estado da Bahia

Conselho Técnico Científico

Prof. Me. Abrãao Carvalho Nogueira – Universidade Federal do Espírito Santo
Prof. Me. Adalberto Zorzo – Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza
Prof. Dr. Adaylson Wagner Sousa de Vasconcelos – Ordem dos Advogados do Brasil/Seccional Paraíba
Prof. Dr. Adilson Tadeu Basquerote Silva – Universidade para o Desenvolvimento do Alto Vale do Itajaí
Prof. Dr. Alex Luis dos Santos – Universidade Federal de Minas Gerais
Prof. Me. Aleksandro Teixeira Ribeiro – Centro Universitário Internacional
Prof^ª Ma. Aline Ferreira Antunes – Universidade Federal de Goiás
Prof. Me. André Flávio Gonçalves Silva – Universidade Federal do Maranhão
Prof^ª Ma. Andréa Cristina Marques de Araújo – Universidade Fernando Pessoa
Prof^ª Dr^ª Andreza Lopes – Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento Acadêmico
Prof^ª Dr^ª Andrezza Miguel da Silva – Faculdade da Amazônia
Prof^ª Ma. Anelisa Mota Gregoleti – Universidade Estadual de Maringá
Prof^ª Ma. Anne Karynne da Silva Barbosa – Universidade Federal do Maranhão
Prof. Dr. Antonio Hot Pereira de Faria – Polícia Militar de Minas Gerais
Prof. Me. Armando Dias Duarte – Universidade Federal de Pernambuco
Prof^ª Ma. Bianca Camargo Martins – UniCesumar

Profª Ma. Carolina Shimomura Nanya – Universidade Federal de São Carlos
Prof. Me. Carlos Antônio dos Santos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof. Me. Christopher Smith Bignardi Neves – Universidade Federal do Paraná
Prof. Ma. Cláudia de Araújo Marques – Faculdade de Música do Espírito Santo
Profª Drª Cláudia Taís Siqueira Cagliari – Centro Universitário Dinâmica das Cataratas
Prof. Me. Clécio Danilo Dias da Silva – Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Prof. Me. Daniel da Silva Miranda – Universidade Federal do Pará
Profª Ma. Daniela da Silva Rodrigues – Universidade de Brasília
Profª Ma. Daniela Remião de Macedo – Universidade de Lisboa
Profª Ma. Dayane de Melo Barros – Universidade Federal de Pernambuco
Prof. Me. Douglas Santos Mezacas – Universidade Estadual de Goiás
Prof. Me. Edevaldo de Castro Monteiro – Embrapa Agrobiologia
Prof. Me. Eduardo Gomes de Oliveira – Faculdades Unificadas Doctum de Cataguases
Prof. Me. Eduardo Henrique Ferreira – Faculdade Pitágoras de Londrina
Prof. Dr. Edwaldo Costa – Marinha do Brasil
Prof. Me. Eliel Constantino da Silva – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita
Prof. Me. Ernane Rosa Martins – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Prof. Me. Euvaldo de Sousa Costa Junior – Prefeitura Municipal de São João do Piauí
Prof. Dr. Everaldo dos Santos Mendes – Instituto Edith Theresa Hedwing Stein
Prof. Me. Ezequiel Martins Ferreira – Universidade Federal de Goiás
Profª Ma. Fabiana Coelho Couto Rocha Corrêa – Centro Universitário Estácio Juiz de Fora
Prof. Me. Fabiano Eloy Atilio Batista – Universidade Federal de Viçosa
Prof. Me. Felipe da Costa Negrão – Universidade Federal do Amazonas
Prof. Me. Francisco Odécio Sales – Instituto Federal do Ceará
Profª Drª Germana Ponce de Leon Ramírez – Centro Universitário Adventista de São Paulo
Prof. Me. Gevair Campos – Instituto Mineiro de Agropecuária
Prof. Me. Givanildo de Oliveira Santos – Secretaria da Educação de Goiás
Prof. Dr. Guilherme Renato Gomes – Universidade Norte do Paraná
Prof. Me. Gustavo Krahl – Universidade do Oeste de Santa Catarina
Prof. Me. Helton Rangel Coutinho Junior – Tribunal de Justiça do Estado do Rio de Janeiro
Profª Ma. Isabelle Cerqueira Sousa – Universidade de Fortaleza
Profª Ma. Jaqueline Oliveira Rezende – Universidade Federal de Uberlândia
Prof. Me. Javier Antonio Albornoz – University of Miami and Miami Dade College
Prof. Me. Jhonatan da Silva Lima – Universidade Federal do Pará
Prof. Dr. José Carlos da Silva Mendes – Instituto de Psicologia Cognitiva, Desenvolvimento Humano e Social
Prof. Me. Jose Elyton Batista dos Santos – Universidade Federal de Sergipe
Prof. Me. José Luiz Leonardo de Araujo Pimenta – Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria Uruguay
Prof. Me. José Messias Ribeiro Júnior – Instituto Federal de Educação Tecnológica de Pernambuco
Profª Drª Juliana Santana de Curcio – Universidade Federal de Goiás
Profª Ma. Juliana Thaisa Rodrigues Pacheco – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Kamilly Souza do Vale – Núcleo de Pesquisas Fenomenológicas/UFPA
Prof. Dr. Kárpio Márcio de Siqueira – Universidade do Estado da Bahia
Profª Drª Karina de Araújo Dias – Prefeitura Municipal de Florianópolis
Prof. Dr. Lázaro Castro Silva Nascimento – Laboratório de Fenomenologia & Subjetividade/UFPR

Prof. Me. Leonardo Tullio – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Prof^ª Ma. Lillian Coelho de Freitas – Instituto Federal do Pará
Prof^ª Ma. Lilians Aparecida Sereno Fontes de Medeiros – Consórcio CEDERJ
Prof^ª Dr^ª Lívia do Carmo Silva – Universidade Federal de Goiás
Prof. Dr. Lucio Marques Vieira Souza – Secretaria de Estado da Educação, do Esporte e da Cultura de Sergipe
Prof. Dr. Luan Vinicius Bernardelli – Universidade Estadual do Paraná
Prof^ª Ma. Luana Ferreira dos Santos – Universidade Estadual de Santa Cruz
Prof^ª Ma. Luana Vieira Toledo – Universidade Federal de Viçosa
Prof. Me. Luis Henrique Almeida Castro – Universidade Federal da Grande Dourados
Prof^ª Ma. Luma Sarai de Oliveira – Universidade Estadual de Campinas
Prof. Dr. Michel da Costa – Universidade Metropolitana de Santos
Prof. Me. Marcelo da Fonseca Ferreira da Silva – Governo do Estado do Espírito Santo
Prof. Dr. Marcelo Máximo Purificação – Fundação Integrada Municipal de Ensino Superior
Prof. Me. Marcos Aurelio Alves e Silva – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo
Prof^ª Ma. Maria Elanny Damasceno Silva – Universidade Federal do Ceará
Prof^ª Ma. Marileila Marques Toledo – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri
Prof. Me. Pedro Panhoca da Silva – Universidade Presbiteriana Mackenzie
Prof^ª Dr^ª Poliana Arruda Fajardo – Universidade Federal de São Carlos
Prof. Me. Ricardo Sérgio da Silva – Universidade Federal de Pernambuco
Prof. Me. Renato Faria da Gama – Instituto Gama – Medicina Personalizada e Integrativa
Prof^ª Ma. Renata Luciane Polsaque Young Blood – UniSecal
Prof. Me. Robson Lucas Soares da Silva – Universidade Federal da Paraíba
Prof. Me. Sebastião André Barbosa Junior – Universidade Federal Rural de Pernambuco
Prof^ª Ma. Silene Ribeiro Miranda Barbosa – Consultoria Brasileira de Ensino, Pesquisa e Extensão
Prof^ª Ma. Solange Aparecida de Souza Monteiro – Instituto Federal de São Paulo
Prof^ª Ma. Taiane Aparecida Ribeiro Nepomoceno – Universidade Estadual do Oeste do Paraná
Prof. Me. Tallys Newton Fernandes de Matos – Faculdade Regional Jaguaribana
Prof^ª Ma. Thatianny Jasmine Castro Martins de Carvalho – Universidade Federal do Piauí
Prof. Me. Tiago Silvio Dedoné – Colégio ECEL Positivo
Prof. Dr. Welleson Feitosa Gazel – Universidade Paulista

Física: o universo e os fenômenos naturais

Editora Chefe: Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira
Bibliotecária: Janaina Ramos
Diagramação: Maria Alice Pinheiro
Correção: Mariane Aparecida Freitas
Edição de Arte: Luiza Alves Batista
Revisão: Os Autores
Organizador: Edson Ribeiro de Britto de Almeida Junior

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

F537 Física: o universo e os fenômenos naturais / Organizador Edson Ribeiro de Britto de Almeida Junior. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2021.

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

ISBN 978-65-5706-903-5

DOI 10.22533/at.ed.035211903

1. Física. I. Almeida Junior, Edson Ribeiro de Britto de (Organizador). II. Título.

CDD 530

Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166

Atena Editora

Ponta Grossa – Paraná – Brasil

Telefone: +55 (42) 3323-5493

www.atenaeditora.com.br

contato@atenaeditora.com.br



Ano 2021

DECLARAÇÃO DOS AUTORES

Os autores desta obra: 1. Atestam não possuir qualquer interesse comercial que constitua um conflito de interesses em relação ao artigo científico publicado; 2. Declaram que participaram ativamente da construção dos respectivos manuscritos, preferencialmente na: a) Concepção do estudo, e/ou aquisição de dados, e/ou análise e interpretação de dados; b) Elaboração do artigo ou revisão com vistas a tornar o material intelectualmente relevante; c) Aprovação final do manuscrito para submissão.; 3. Certificam que os artigos científicos publicados estão completamente isentos de dados e/ou resultados fraudulentos; 4. Confirmam a citação e a referência correta de todos os dados e de interpretações de dados de outras pesquisas; 5. Reconhecem terem informado todas as fontes de financiamento recebidas para a consecução da pesquisa.

APRESENTAÇÃO

A coletânea “Física: O Universo e os Fenômenos Naturais” é uma obra que tem como foco principal a discussão científica por intermédio dos trabalhos que compõem seus capítulos. O volume abordará, de forma categorizada e interdisciplinar, resultados de pesquisas, relatos de casos e/ou revisões que transitam no pluralismo conceitual e epistemológico da Física e seu ensino.

O objetivo central do livro é apresentar, de forma categorizada e clara, estudos desenvolvidos em diversas instituições de ensino e pesquisa do Brasil. A Física é uma ciência natural baseada em experimentos, medições e análises matemáticas com o propósito de encontrar leis físicas quantitativas para tudo, desde o nano mundo do microcosmo aos planetas, sistemas solares e galáxias que ocupam o macrocosmo. Temas diversos e interessantes são, deste modo, discutidos aqui com a proposta de fundamentar o conhecimento de acadêmicos, mestres, doutores e todos aqueles que de alguma forma se interessam pela Física e seus processos de ensino e de aprendizagem.

Os autores do primeiro capítulo da obra, por meio dos parâmetros estruturais de um poço quântico de GaAs com barreiras de AlGaAs, simularam os níveis de energia, funções de onda e densidade de probabilidade, por meio de uma solução numérica da Equação de Schrödinger, independente do tempo, para um poço finito. Com os resultados da interação elétron-buraco para os diferentes níveis energéticos do poço, o referido trabalho apresenta um exemplo direto e simples na solução de poços de potenciais quânticos reais. O segundo capítulo apresenta um trabalho experimental, no qual os autores utilizaram um termômetro de infravermelho de baixo custo para estimar a água precipitável na região de Florianópolis-SC. Fundamentado na dinâmica molecular clássica, os autores do terceiro capítulo discutem as propriedades termodinâmicas em sistemas binários e ternários compostos por óleo leve, CO₂ e salmoura para aplicações envolvendo recuperação aprimorada de petróleo. O quarto capítulo apresenta resultados de um estudo dos movimentos orbitais de detritos espaciais na vizinhança da Estação Espacial Internacional com o intuito de rastreá-los, visando evitar colisões entre eles e satélites artificiais operacionais.

Os demais trabalhos apresentam instrumentos e metodologias para o ensino de Física. O quinto capítulo, por exemplo, usam a abordagem da modelagem científica de Bunge, adotando um objeto-modelo experimental e o incorporando na teoria da Mecânica Newtoniana para o desenvolvimento de um modelo teórico-prático validado empiricamente. Seguindo a perspectiva de propostas experimentais para o ensino de Física, o sexto capítulo discute a possibilidade de demonstração do efeito magnético de um ímã em um solenoide por meio da construção de um Trem Magnético. O sétimo capítulo parte da grade comum dos conteúdos ensinados no curso de graduação em Física relacionados à dinâmica de rotações, para explicar o funcionamento do giroscópio, pião, tip-top e spinner, os quais, apesar de serem normalmente utilizados para recreação, possuem também aplicações

educacionais e outras utilidades muito interessantes de serem exploradas na área de Ensino de Física.

Além de práticas experimentais “manuais”, alguns trabalhos contemplam propostas para a ludicidade do ensino de Física. O oitavo trabalho incorporou o estudo de trajetórias bidimensionais de forma integrada, aliando a confecção de uma catapulta caseira em escala, no estilo Trebuchet, à realização de um estudo incisivo dos conceitos físicos necessários para descrição de seu funcionamento. A constituição de dados experimentais e simulações das trajetórias, foram obtidas por intermédio do software livre Tracker. O nono e último trabalho apresenta a potencialidade de recursos, como jogos educativos, como ferramenta de inclusão de alunos surdos, no que diz respeito aos processos de ensino e de aprendizagem de Física I.

Deste modo, essa leitura proporcionará um repertório de trabalhos bem fundamentados e com resultados práticos, obtidos por diversos professores e acadêmicos que arduamente desenvolveram seus trabalhos que aqui serão apresentados de maneira concisa e didática. Sabemos o quão importante é a divulgação científica, por isso evidenciamos também a estrutura da Atena Editora capaz de oferecer uma plataforma consolidada e confiável para estes pesquisadores exporem e divulguem seus resultados.

Edson Ribeiro de Britto de Almeida Junior

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1..... 1

ANALISE ÓPTICA E SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA INTERAÇÃO ELÉTRON-BURACO EM POÇO QUÂNTICO DE GAS COM BARREIRAS DE ALGAS

João Vitor de Souza Paz
Jesus Maria Herazo Warnes
Marcio Daldin Teodoro
Rômulo Ronan Oliveira de Moraes
Leonardo Dias de Souza

DOI 10.22533/at.ed.0352119031

CAPÍTULO 2..... 12

ESTIMATIVAS DA ÁGUA PRECIPITÁVEL ATMOSFÉRICA A PARTIR DE UM TERMÔMETRO DE INFRAVERMELHO

Renato Ramos da Silva
Joana Zanette Crema
Rubinei Dorneles Machado

DOI 10.22533/at.ed.0352119032

CAPÍTULO 3..... 23

MOLHABILIDADE EM INTERFACES BINÁRIAS E TERNÁRIAS COMPOSTAS DE CO₂, SALMOURA E ÓLEO, VIA DINÂMICA MOLECULAR CLÁSSICA

Lucas S. de Lara
Danilo V. dos Santos
Derik W. Gryczak
Taiza A.S. do Carmo
Alexandre C. Junior
Andressa Novatski

DOI 10.22533/at.ed.0352119033

CAPÍTULO 4..... 44

REENTRY AND COLLISION RISK OF SPACE DEBRIS IN LEO REGION

Jarbas Cordeiro Sampaio
Ewerton Felipe Barbosa Paim dos Santos

DOI 10.22533/at.ed.0352119034

CAPÍTULO 5..... 58

MODELAGEM CIENTÍFICA: CONSTRUÇÃO DE MODELO TEÓRICO DE DUAS MOLAS ASSOCIADAS EM SERIE E EM PARALELO SOB A ABORDAGEM ENERGÉTICA

Ricardo Robinson Campomanes Santana
Vitória Luiza Fernandes Frare
Jean Reinildes Pinheiro

DOI 10.22533/at.ed.0352119035

CAPÍTULO 6	72
UMA PROPOSTA EXPERIMENTAL NO ESTUDO DO ELETROMAGNETISMO: TREM MAGNÉTICO SIMPLES	
José Tiago de Sousa	
Isaiane Rocha Bezerra	
Bento Bruno de Sousa	
Gilson Mauriz Gomes	
DOI 10.22533/at.ed.0352119036	
CAPÍTULO 7	79
PIÕES, SPINERS E GIROSCÓPIOS, BRINQUEDOS E APLICAÇÕES FÍSICAS	
Gabrielly Maria Camargo de Jesus	
João Marcos Fávoro Lopes	
Leandro Morais Azevedo	
Luiz Felipe Demétrio	
Pedro Haerter Pinto	
Marcos Cesar Danhoni Neves	
DOI 10.22533/at.ed.0352119037	
CAPÍTULO 8	88
TREBUCHET: EFEITO DA RESISTÊNCIA DO AR NO MOVIMENTO DE PROJÉTEIS	
José Flávio Marcelino Borges	
Ráfaga Wiecheteck Vurobi	
Lucas Stori de Lara	
Fabiana Cristina Nascimento Borges (Em memória)	
DOI 10.22533/at.ed.0352119038	
CAPÍTULO 9	100
JOGOS EDUCATIVOS ADAPTADOS COMO RECURSO DE APRENDIZAGEM DE FÍSICA I PARA DISCENTES SURDOS NO INSTITUTO FEDERAL DO AMAZONAS-IFAM/CMC	
Carla Caroline Melgueira Silva	
Allaiza Thaisa Maia Menezes	
Fabrício de Oliveira Farias	
Klinsley Silva Rosas	
DOI 10.22533/at.ed.0352119039	
SOBRE O ORGANIZADOR	116
ÍNDICE REMISSIVO	117

CAPÍTULO 1

ANÁLISE ÓPTICA E SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA INTERAÇÃO ELÉTRON-BURACO EM POÇO QUÂNTICO DE GAAS COM BARREIRAS DE ALGAAS

Data de aceite: 01/03/2021

João Vitor de Souza Paz

Universidade Tecnológica Federal do Paraná –
Campus Apucarana
Apucarana – Paraná
<http://lattes.cnpq.br/1531428541470762>

Jesus Maria Herazo Warnes

Universidade Tecnológica Federal do Paraná –
Campus Apucarana, Departamento Acadêmico
de Física
Apucarana – Paraná
<http://lattes.cnpq.br/6049214278133044>

Marcio Daldin Teodoro

Universidade Federal de São Carlos,
Departamento de Física
São Carlos – São Paulo
<http://lattes.cnpq.br/5602634309535528>

Rômulo Ronan Oliveira de Moraes

Universidade Federal de Rondonópolis,
Instituto de Ciências Naturais e da Terra
Rondonópolis – Mato Grosso
<http://lattes.cnpq.br/4990281576230103>

Leonardo Dias de Souza

Universidade Tecnológica Federal do Paraná –
Campus Apucarana, Departamento Acadêmico
de Física
Apucarana – Paraná
<http://lattes.cnpq.br/5465233666208840>

RESUMO: No presente trabalho utilizamos parâmetros estruturais conhecidos de um poço

quântico de GaAs com barreiras de AlGaAs para simular os níveis de energia, funções de onda e densidade de probabilidade, através de uma solução numérica da Equação de Schrödinger independente do tempo para um poço finito. A partir dos resultados da simulação foi possível calcular a energia de transição elétron-buraco entre o nível fundamental e os primeiros níveis excitados do poço. Com os resultados da interação elétron-buraco para os diferentes níveis energéticos do poço, foi possível confrontá-los com um espectro de fotoluminescência da amostra obtido à 8 K, com o objetivo de identificar se o pico principal do espectro tem origem na transição do nível fundamental, primeiro nível excitado ou segundo nível excitado do poço. Portanto, este trabalho apresenta um exemplo direto e simples na solução de poços de potenciais quânticos reais.

PALAVRAS - CHAVE: Poço-quântico, Fotoluminescência, Simulação Numérica.

OPTICAL ANALYSIS AND NUMERICAL SIMULATION OF THE ELECTRON-HOLE INTERACTION IN A GAAS QUANTUM WELL WITH ALGAAS BARRIERS

ABSTRACT: In the present work, we used known parameters of a GaAs quantum well with AlGaAs barriers to simulate energy levels, wave functions and probability density, using a numerical solution of the time-independent Schrödinger equation for a finite quantum well. From the results of the simulation, it was possible to calculate the electron-hole transition energy between the fundamental level and the first excited levels of the well. With the results of the electron-hole interaction for the different energy levels of the

well, it was possible to compare them with sample's photoluminescence spectrum obtained at 8 K, in order to identify whether the main peak of the photoluminescence spectrum is related to the transition from the fundamental level, the first excited level or the second excited level of the well. Therefore, this work presents a direct and simple example in the solution of potentials of real quantum wells.

KEYWORDS: Quantum Well, Photoluminescence, Numerical Simulation.

1 | INTRODUÇÃO

Nos dias atuais o estudo dos materiais semicondutores tem grande importância para o avanço da eletrônica e microeletrônica (DIAS, 1991). Dispositivos podem ser construídos através de diferentes estruturas e combinações de ligas semicondutoras, podendo formar estruturas binárias, ternárias e até mesmo quartanárias (DIAS, 1991). Uma dessas estruturas é a chamada poço quântico, onde se tem um elétron confinado entre barreiras de potencial finitas ou infinitas. A construção real desse sistema consiste em produzir um material semiconductor com um determinado *gap* de energia entre duas camadas de outro material com um *gap* maior (MORAIS et al., 2009).

Conforme as características do poço quântico como largura e composição dos materiais que constituem as barreiras e o poço, os poços quânticos apresentam níveis quantizados de energia característicos para elétrons e buracos. Desta forma pode-se produzir diferentes sistemas com energias de transição desejadas, cuja aplicação maior reside na construção dos modernos e eficientes lasers de estado sólido amplamente empregados na indústria e meio científico.

Utilizando parâmetros da amostra é possível realizar uma simulação teórica dos níveis de energia contidos na estrutura semicondutora, a fim de prever teoricamente o comportamento energético da mesma. Para realizar a simulação dos níveis de energia contidos em um poço quântico finito é necessário resolver a Equação de Schrödinger, assim obtendo duas soluções que são utilizadas para obter de forma numérica os níveis de energia do poço.

Neste trabalho apresentamos a revisão de um método simples para calcular teoricamente os níveis de energia em uma estrutura tipo poço quântico finito e real composto pelas ligas de Arseneto de Gálio (GaAs) com barreiras de Arseneto de Gálio Alumínio ($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$). Os valores obtidos teoricamente serão comparados com resultados experimentais obtidos através da técnica de espectroscopia de fotoluminescência.

2 | MATERIAIS E MÉTODOS

Bem tradicionais na mecânica quântica os poços de potenciais são soluções amplamente utilizadas, pois podem ter suas construções modeladas de várias formas para atingir objetivos tanto do ponto de vista acadêmico quanto em aplicações tecnológicas. O poço mais simples que podemos ter é um poço quadrado (simétrico em relação ao eixo

x) de potencial infinito. Uma aplicação simples do poço infinito é o confinamento de um elétron em uma placa metálica, muito fina (simulando uma situação 2D). Nesse sistema o confinamento acontece na direção da espessura da placa e o elétron pode se mover ao longo do plano (PAULINO et al., 2010).

O poço de potencial infinito é um poço quântico onde sua principal característica é ter a energia potencial muito grande quando comparada a energia cinética da partícula (EISBERG; RESNICK, 1994), criando a possibilidade de confinar espacialmente um portador de carga em uma direção espacial (direção de crescimento), ao mesmo tempo em que o portador tem liberdade de movimento no plano perpendicular à direção onde ocorre o confinamento. Do ponto de vista da mecânica clássica, partículas confinadas neste poço de energia podem assumir qualquer energia, mas na mecânica quântica, apenas certos valores discretos de energia são possíveis (EISBERG; RESNICK, 1994).

Na figura 1(a) podemos ver o esquema energético de um poço infinito. De $-L/2$ até $L/2$ temos um potencial igual a zero (região de dentro do poço com largura total L) e nas regiões fora do poço (de menos infinito até $-L/2$ e de $L/2$ até infinito) temos um potencial infinito (EISBERG; RESNICK, 1994).

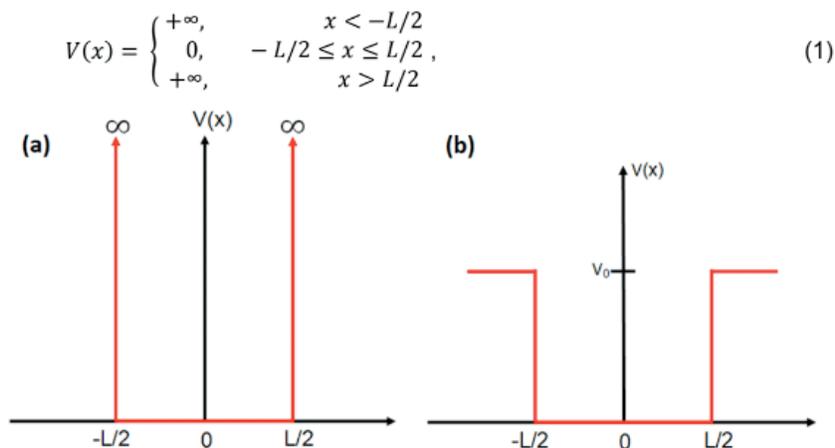


Figura 1: Representação esquemática (a) de um poço infinito e (b) de um poço finito.

As energias e as funções de onda são encontradas exatamente ao resolver a equação de Schrödinger independente do tempo, cujos resultados são dados pelas seguintes equações (EISBERG; RESNICK, 1994, ZETTILI, 2009):

$$E_n = \frac{\pi^2 \hbar^2 n^2}{2mL^2}; n = 1, 2, 3 \dots \quad (2)$$

$$\psi_n(x) = \begin{cases} \sqrt{\frac{2}{L}} \cos\left(\frac{n\pi}{L}x\right); & n = 1, 3, 5 \dots \\ \sqrt{\frac{2}{L}} \sin\left(\frac{n\pi}{L}x\right); & n = 2, 4, 6 \dots \end{cases} \quad (3)$$

onde \hbar é a constante de Planck dividida por 2π , m é a massa do elétron, L a largura do poço e n é um número inteiro positivo que caracteriza o nível de energia.

Nota-se que as funções de onda para n ímpar são simétricas, enquanto que para n par são anti-simétricas (ZETTILI, 2009). O módulo quadrado da função de onda fornece a densidade de probabilidade de encontrar uma partícula confinada em determinado estado (ZETTILI, 2009).

Quando a energia potencial do poço não é suficientemente grande se comparada à energia cinética da partícula tem-se um poço quântico finito. O poço finito é um sistema quântico onde tem-se uma partícula confinada em um potencial (força atrativa exercida sobre a partícula) finito, em que o poço apresenta a característica de ser quadrado (EISBERG; RESNICK, 1994). Ao explorar esse problema bastante conhecido da mecânica quântica, pode-se observar e modelar fenômenos muito interessantes como, por exemplo, a quantização de energia do poço. Semicondutores podem ser utilizados para produzir estruturas reais com potencial do tipo poço quântico (FILHO; ALEXANDRINO; CABRAL, 2018).

Na figura 1(b) pode-se observar o esquema de um poço quântico quadrado finito. De menos infinito até $-L/2$ a energia potencial é V_0 , de $-L/2$ até $L/2$ a energia potencial é zero e de $L/2$ até infinito o potencial é V_0 (EISBERG; RESNICK, 1994).

$$V(x) = \begin{cases} V_0, & x < -L/2 \text{ ou } x > L/2 \\ 0, & -L/2 \leq x \leq L/2 \end{cases} \quad (4)$$

O ponto de partida para determinar os níveis de energia quantizados do problema de poço finito é a equação de Schrödinger, para o nosso caso a mesma será unidimensional e independente do tempo (EISBERG; RESNICK, 1994). A equação de Schrödinger é dada por:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2\psi(x)}{dx^2} + V_0\psi(x) = E\psi(x). \quad (5)$$

A solução geral para a equação (5), para a região dentro do poço ($-L/2 < x < L/2$) é dada por (EISBERG; RESNICK, 1994):

$$\psi(x) = A \sin(k_1 x) + B \cos(k_1 x), \quad (6)$$

$$\text{onde } k_1 = \sqrt{2mE/\hbar}.$$

Para as regiões externas do poço, a solução da equação (5) é dada por (EISBERG; RESNICK, 1994):

$$\psi(x) = C e^{k_2 x} + D e^{-k_2 x}, \quad x < -L/2 \quad (7)$$

$$\psi(x) = F e^{k_2 x} + G e^{-k_2 x}, \quad x > L/2 \quad (8)$$

onde $k_2 = \sqrt{2m(V_0 - E)/\hbar}$, e as letras de A até G são valores constantes, e k_1 e k_2 são os correspondentes vetores de onda dentro do poço e das barreiras.

A partir das equações (6), (7) e (8) e aplicando as condições de contorno ($V_0, x < -L/2$ ou $x > L/2$ e $0, -L/2 \leq x \leq L/2$) é possível obter duas soluções para o cálculo dos níveis de energia dentro de um poço finito (EISBERG; RESNICK, 1994).

$$\sqrt{\frac{m^* E L^2}{2\hbar^2}} \tan\left(\sqrt{\frac{m^* E L^2}{2\hbar^2}}\right) = \sqrt{\frac{m^* (V_0 - E) L^2}{2\hbar^2}}, \quad (9)$$

$$-\sqrt{\frac{m^* E L^2}{2\hbar^2}} \cot\left(\sqrt{\frac{m^* E L^2}{2\hbar^2}}\right) = \sqrt{\frac{m^* V_0 L^2}{2\hbar^2} - \frac{m^* E L^2}{2\hbar^2}} \quad (10)$$

A equação (9) descreve os níveis de energia pares (incluindo o nível fundamental), enquanto que a equação (10) descreve os níveis de energia ímpares (EISBERG; RESNICK, 1994).

Ambas as equações serão utilizadas posteriormente para efetuar o cálculo teórico e comparar os resultados com os obtidos experimentalmente em uma amostra de poço de GaAs/AlGaAs.

3 I AMOSTRA

A amostra analisada neste trabalho foi crescida através da técnica de MBE (*Molecular Beam Epitaxy*), sobre um substrato semi-isolante de GaAs (001) seguido por uma camada buffer de $1 \mu\text{m}$ de GaAs. Na sequência foi crescida uma super-rede com 30 repetições de $[\text{Al}_{0,18}\text{Ga}_{0,82}\text{As}/\text{GaAs} (50 \text{ \AA})]$, uma camada de 20 \AA de AlAs e duas barreiras de 500 \AA de espessura de $\text{Al}_{0,18}\text{Ga}_{0,82}\text{As}$ confinando uma camada de GaAs de 150 \AA . Uma camada final de AlAs de 20 \AA e uma Cap Layer de GaAs com 50 \AA fecha a estrutura, conforme apresentado esquematicamente na figura 2.

a profundidade do poço de potencial para os buracos na banda de valência através do *offset* da banda de valência (E_v). A massa efetiva do elétron m^* neste poço de GaAs é de $0,067m_0$ e para o buraco é de $0,53m_0$, onde m_0 é a massa do elétron (NAKWASKI,1995). A largura do poço para fins de cálculos será adotada como a largura nominal de crescimento da estrutura, 150 Å.

Os resultados dos cálculos teóricos para este poço quântico são apresentado na figura 3, com as indicações de E_v , E_c e os *gaps* do AlGaAs e GaAs.

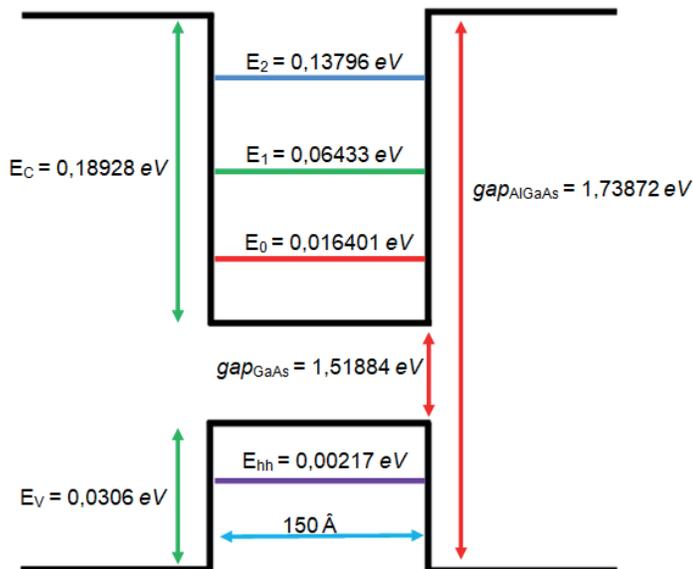


Figura 3 – Representação esquemática dos níveis energéticos do poço quântico finito.

Para obter teoricamente os valores dos níveis de energia do poço quântico (níveis de energia pares), foi utilizada a equação (9) resolvendo-a de forma numérica, onde m^* é a massa efetiva do elétron ($0,067m_0$), L a largura do poço quântico, \hbar é a constante de Planck dividido por 2π , V_0 , a intensidade do potencial do poço quântico e E o nível de energia. Devido aos valores extremamente pequenos da constante de Planck, largura do poço e da intensidade do potencial é necessário reescrever estes parâmetros em termos de outras grandezas conhecidas, de modo a facilitar os cálculos numéricos. Assim a largura do poço foi reescrita em termos do raio do átomo de hidrogênio ($a_0 = 0,53 \text{ \AA}$), a constante de Planck dividida por 2π foi normalizada ($\hbar = 1$), os *offsets* das bandas de valência e de condução que são equivalentes ao potencial do poço quântico foram convertidos em função da energia do átomo de Hidrogênio ($\epsilon_0 = 27,2 \text{ eV}$, é duas vezes a energia do estado fundamental do átomo de hidrogênio) e a massa do elétron também é unitária ($m_0 = 1$).

Para a determinação dos níveis de energia na banda de condução e de valência foram utilizados os parâmetros da tabela 1.

Parâmetros	Valores para banda de condução	Valores para banda de valência
L	$283,01886 a_0$	$283,01886 a_0$
V	$0,695882 \cdot 10^{-3} \epsilon_0$	$1,125 \cdot 10^{-3} \epsilon_0$
m^*	$0,067 m_0$	$0,53 m_0$

Tabela 1 – Parâmetros utilizados para determinação dos níveis de energia.

Usando estes parâmetros e as equações (9) e (10) foi possível obter os resultados apresentados na tabela 2.

Nível	$E (\epsilon_0)$	$E (eV)$
1° nível do poço (E_0)	0,000603	0,016401
2° nível do poço (E_1)	0,002365	0,064330
3° nível do poço (E_2)	0,005072	0,137960
Nível da Banda de Valência (E_{hh})	0,000079	0,002170

Tabela 2 – Valores teóricos para os níveis de energia do poço (banda de condução) e para banda de valência em termos de ϵ_0 e em unidades de eV.

As energias E_0 , E_1 e E_2 apresentadas na tabela 2 correspondem aos níveis quantizados na banda de condução, acessíveis para elétrons, enquanto que E_{hh} é um nível quantizado da banda de valência, acessível para buracos presentes na região do poço quântico.

A partir dos níveis de energia demonstrados na figura 3 juntamente com a energia de *gap* do GaAs, é possível determinar o valor teórico para a energia de recombinação elétron-buraco para o nível fundamental e para os níveis excitados do poço. A energia de recombinação através dos níveis fundamentais do poço é dada pela soma da energia do nível fundamental de elétrons (E_0) e do nível fundamental de buraco pesado (E_{hh}) com a energia de *gap* do GaAs. De modo geral podemos escrever:

$$E_{(en)} = E_n + E_{hh} + E_{g(GaAs)}. \quad (13)$$

Com os resultados apresentados na tabela 2 é possível determinar o valor teórico para a energia de recombinação elétron-buraco para o nível fundamental e os níveis

excitados do poço quântico através da equação (13).

$$E_{(e_0)} = 0,016401 \text{ eV} + 0,0021698 \text{ eV} + 1,51884 \text{ eV} = 1,53741 \text{ eV}$$

$$E_{(e_1)} = 0,064330 \text{ eV} + 0,0021698 \text{ eV} + 1,51884 \text{ eV} = 1,58534 \text{ eV}$$

$$E_{(e_2)} = 0,13796 \text{ eV} + 0,0021698 \text{ eV} + 1,51884 \text{ eV} = 1,65897 \text{ eV}$$

Com estes resultados foi possível obter numericamente as funções de onda e a densidade de probabilidade nos níveis quantizados da banda de condução.

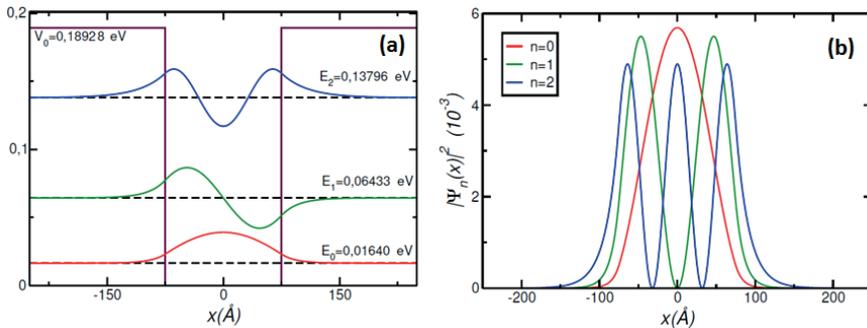


Figura 4 – (a) funções de onda ($0,3 \psi_n(x)$) e (b) densidades de probabilidade calculadas para os 3 níveis do poço.

Na figura 4(a) temos as funções de onda para o poço quântico, onde as mesmas foram multiplicadas por um fator de escala de 0,3 para uma melhor visualização destas individualmente. Ao analisarmos as funções de onda representadas na figura 4(a), nota-se que as mesmas se estendem para as regiões externas ao poço, esse é um fenômeno que classicamente seria impossível de ocorrer já que $E < V_0$. Outro aspecto importante das regiões classicamente proibidas é que enquanto menor a energia mais rapidamente as funções de onda tendem a zero.

A partir das funções de onda ao quadrado é possível obter a densidade de probabilidade para os níveis energéticos, mostrados na figura 4(b). Podemos notar que o pico que representa o nível fundamental do poço ($n=0$) é maior em relação aos picos para os níveis excitados e isso significa que a probabilidade de encontrar o elétron no seu estado fundamental é maior quando comparado aos estados excitados.

Na figura 5 apresentamos o espectro de fotoluminescência (PL) da amostra estudada, obtido a temperatura de 8 K e potência de 6 μW . Nesse regime de potência e com essa configuração experimental podemos notar a presença de um pico de maior intensidade denominado pico principal. No regime de potência trabalhado não foi possível

observar transições elétron-buraco para o primeiro e segundo nível excitado.

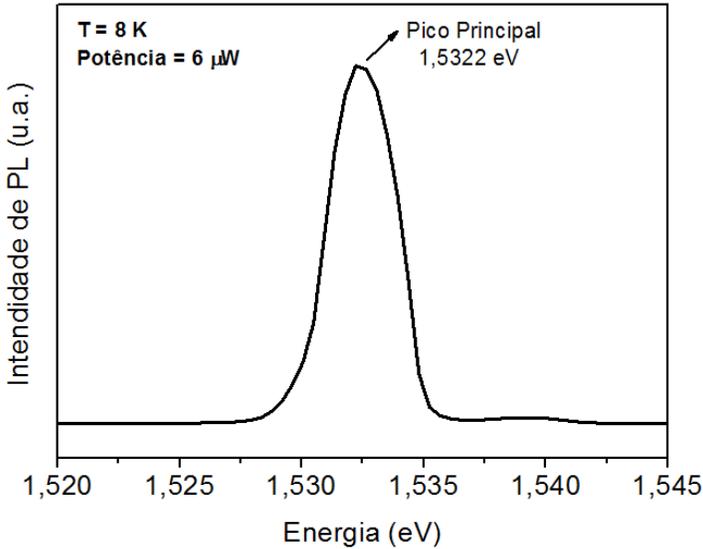


Figura 5 – Espectro de fotoluminescência à temperatura de 8 K.

A partir do espectro de fotoluminescência apresentado na figura 5 é possível obter a energia do pico principal que é de 1,5322 eV. Ao compararmos com o valor teórico de 1,53741 eV temos uma boa concordância entre o valor teórico e experimental.

5 I CONCLUSÃO

No presente trabalho realizou-se o cálculo teórico dos níveis de energia de um poço de GaAs com barreiras de AlGaAs. Foram obtidos os valores teóricos das energias para transição elétron-buraco, possibilitando obter as funções de onda e as densidades de probabilidade. Comparando o valor de energia do pico principal do espectro fotoluminescência da amostra com as possíveis transições calculadas foi possível identificar que no regime de potência trabalhado não há transições de níveis excitados do poço e que a energia de transição teórica do nível fundamental da banda de condução para o nível fundamental da banda de valência está em um bom acordo com o valor experimental. Analisando as funções densidade de probabilidade, notamos que é mais provável encontrar o elétron no nível fundamental. Portanto, os resultados obtidos pelo uso de um modelo amplamente conhecido de mecânica quântica são muito bem exemplificados através da comparação com os resultados experimentais medidos por uma técnica de espectroscopia aplicada a um poço quântico real.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao prof. Dr. Alain Quivy pelo crescimento da amostra utilizada neste estudo.

REFERÊNCIAS

BLAKEMORE, J. S. Semiconducting and other major properties of gallium arsened. **Journal of Applied Physics**. v. 53, p. 123-181, maio 1982.

DIAS, I. F. L. Novos materiais e estruturas semicondutoras. **Semina**, v. 12, n. 4, p.265-274, dez. 1991.

EISBERG,R.; RESNICK,R. **Física Quântica: Átomos, Moléculas, Sólidos Partículas**. 9. ed. Rio de Janeiro: Editora Campus,1994.

EKPUNOBI, A. J. Band offsets and properties of AlGaAs/GaAs and AlGaN/GaN material systems. **Superlattices and Microstructures**. v. 31, n. 5, p. 247-252, maio 2002.

FILHO, G. M. R.; ALEXANDRINO, C. H.; CABRAL, S. C. O poço de potencial quântico infinito: um estudo usando o método de fatoração. **Revista Vozes dos Vales: Publicações acadêmicas**. n.14, out, 2018.

MORAIS, R.; DIAS, I.; DA SILVA, M.; CESAR, D.; DUARTE, J.; LOURENÇO, S.; LAURETO, E.; DA SILVA, E.; QUIVY, A. A. Effects of confinement on the electron–phonon interaction in $\text{Al}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{As}/\text{GaAs}$ quantum Wells. **Journal of Physics: Condensed Matter**. v.21, n.155601 (2009).

NAKWASKI, W. Effective masses of electrons and heavy holes in GaAs, InAs, AlAs and their ternary compounds. **Physica B**. v. 210, p. 1-25, abril 1995.

PAULINO, K. H.; FILHO, E. D.; PULICI, A. R.; RICOTTA, R. M. Solução quântica para poço duplo quadrado unidimensional assimétrico. **Revista Brasileira de Ensino de Física**. v. 32, n. 4, 4306, Oct/ Dec.2010.

ZETTLI, N. **Quantum Mechanics: Concept and Applications**, 2.ed, Jacksonville: Wiley, 2009.

CAPÍTULO 2

ESTIMATIVAS DA ÁGUA PRECIPITÁVEL ATMOSFÉRICA A PARTIR DE UM TERMÔMETRO DE INFRAVERMELHO

Data de aceite: 01/03/2021

Data de submissão: 02/12/2020

Renato Ramos da Silva

Universidade Federal de Santa Catarina
(UFSC), Departamento de Física
Florianópolis – SC
<http://lattes.cnpq.br/9733821952821123>

Joana Zanette Crema

Universidade Federal de Santa Catarina
(UFSC), Engenharia de Energia
Araranguá – SC
<http://lattes.cnpq.br/6030352405355500>

Rubinei Dorneles Machado

Universidade Federal de Santa Catarina
(UFSC), Departamento de Engenharia
Mecânica
Florianópolis – SC
<http://lattes.cnpq.br/7305167534598258>

RESUMO: A água precipitável (AP) é uma importante variável atmosférica. Sua estimativa é de grande importância pois pode determinar a intensidade de um fenômeno com chuvas extremas ou períodos de estiagem. Em geral suas estimativas são feitas por várias técnicas como através de imagens de satélites meteorológicos, perfis de radiosondas e medidas por radiômetros. No presente estudo usamos um termômetro de infravermelho de baixo custo para estimar a água precipitável na região de Florianópolis-SC. No período entre Maio de 2015 e Junho de 2016 o termômetro de infravermelho foi usado para medir

a temperatura aparente da atmosfera através de apontamento do termômetro na direção do zênite celeste. As medidas foram feitas no horário de 12:00 UTC para coincidir com as estimativas de Água Precipitável (AP) feitas por radiosondagens do aeroporto de Florianópolis. Comparações entre as medidas feitas com o termômetro de infravermelho e com medidas por radiômetros mostraram forte aderência entre os dados. Comparações entre as medidas de temperatura e de estimativas de AP para dias de céu claro mostraram não apenas alta correlação entre os dados, mas permitiu também estabelecer uma equação empírica para estimativas de AP através de eventuais medidas de temperatura com o termômetro de infravermelho.

PALAVRAS - CHAVE: Água precipitável, radiação, termômetro de infravermelho, Florianópolis.

ESTIMATES OF PRECIPITABLE WATER FROM AN INFRARED THERMOMETER

ABSTRACT: Precipitable water (PW) is an important atmospheric variable. Its estimate is of great importance because it can determine the intensity of a phenomenon such as extreme rains or drought periods. In general, their estimates are made by various techniques, such as images from meteorological satellites, radiosonde profiles and measurements by radiometers. In the present study, we used a low-cost infrared thermometer to estimate the precipitable water in the city of Florianópolis-SC region. In the period between May 2015 and June 2016, the infrared thermometer was used to measure the apparent

temperature of the atmosphere by pointing the thermometer towards the celestial zenith. The measurements were carried on at 12:00 UTC time to coincide with the estimates of PW made by radiosondes from the Florianópolis airport. Comparisons between measurements made with the infrared thermometer and measurements with radiometers showed strong correlation between these variables. Comparisons between temperature measurements and PW estimates for clear sky days showed not only a high correlation between the variables, but also allowed to establish an empirical equation for PW estimates through possible temperature measurements with the infrared thermometer.

KEYWORDS: Precipitable water, radiation, infrared thermometer, Florianopolis.

1 | INTRODUÇÃO

A água precipitável é uma variável atmosférica de grande importância. A água na atmosfera pode ser observada em todos os três estados termodinâmicos: vapor de água, água condensada ou partículas de gelo. As moléculas de água são um importante gás de efeito estufa porque podem absorver radiação térmica em várias bandas de acordo com seus modos de rotação e vibração (LIOU 2002). Assim, quanto maior a concentração de água mais forte é o fluxo de radiação de ondas longas da atmosfera para a superfície.

A água precipitável (AP) pode ser estimada pela razão de mistura (gramas de água por quilograma de ar) das moléculas de água que estão presentes em uma coluna atmosférica. Estimativas da AP podem ser obtidas por várias maneiras, como através de radiosondas que são perfis medidos por balão atmosférico, radiômetros in situ e sensores infravermelhos. A Tabela 01 apresenta as principais técnicas usadas para medidas de AP. A maioria dessas medidas são caras, ou feitas esporadicamente, e não estão disponíveis na maioria dos locais. Portanto, encontrar maneiras de medir a AP usando sensores de baixo custo pode melhorar nossa capacidade de representar melhor as condições atmosféricas.

Tipo de medida de AP	Referencia
Espectrômetro de Prisma	(FOWLER, 1912)
Fotômetro solar	(VOLZ, 1974)
Diodes de Emissão (LEDS)	(MIMS III 1992; BROOKS, 2001)
Radiosonda	(PETTIFER, 2009)
Radiômetro de microondas	(LILJEGREN 1994)
Ocultação por GPS	(GUTMAN & BENJAMIN, 2001; BEVIS et al. 1992)
Satélite Sensor MODIS	(KAUFMAN & GAO, 1992)
Satélite TIROS/TOVS	(SODEN & LANZANTE 1995)
Radiômetro de infravermelho	(MAGHRABI & CLAY 2010)
Termômetro de infravermelho	(MIMS et al. 2011)

Tabela 01 – Sumario de exemplos de medidas de Agua precipitável (AP) através de vários tipos instrumentos.

Recentemente, algumas estimativas de AP foram obtidas com instrumentos de baixo custo, como diodos emissores de luz (LEDs) que foram usados no programa GLOBE (BROOKS, D. R. 2001) ou por termômetro infravermelho que foi usado para a região do Texas na América do Norte (MIMS et al. 2011). Usando o termômetro para estimar a temperatura aparente do céu no zênite, Mims et al. (2011) foram capazes de estimar a AP local e conseguiram produzir uma relação empírica entre a AP e a temperatura aparente do céu. Como moléculas atmosféricas de vapor d'água (i.e. H_2O) absorvem a radiação de onda longa, esta radiação é re-emitida de volta para a superfície. Portanto, variações na concentração destas moléculas alteram o efeito estufa através de mudanças no fluxo de radiação que pode ser detectada por um termômetro de infravermelho.

Neste estudo apresentamos os resultados das medições de temperatura atmosférica realizadas com um termômetro de baixo custo durante um ano inteiro na cidade de Florianópolis. Em seguida, as medidas são comparadas com dados medidos por radiômetros padrão e por perfis atmosféricos de radiosondagens locais. Finalmente, uma relação empírica é obtida para fornecer estimativas de AP de acordo com as medidas de temperatura.

2 | METODOLOGIA

Um termômetro infravermelho de baixo custo (cerca de 25 dólares) foi usado para medir a temperatura atmosférica para o período entre maio de 2015 e junho de 2016. Este termômetro da marca FLUS IR-802 (Fig. 1) opera na faixa de radiação entre 8-14 micrômetros e permite medidas de temperatura na faixa de $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $550\text{ }^{\circ}\text{C}$. O termômetro foi usado diariamente para registrar a temperatura atmosférica aparente apontando o termômetro para o zênite celeste. Os registros foram realizados às 12:00 UTC (09:00 hora local) para coincidir com o horário de lançamento das radiosondagens feitas no aeroporto de Florianópolis. Além das medidas de temperatura foram anotadas também as condições de cobertura de nuvens no momento da medida identificando casos de céu claro ou com presença de nuvens.



Figura 01 - Ilustração de um termômetro de infravermelho (marca FLUS IR-802) usado para medidas da temperatura aparente da atmosfera a partir do zênite celeste.

As medidas de temperatura atmosférica foram obtidas no campus da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) na cidade de Florianópolis (27,5°S; 48,5°W) localizada na Ilha de Santa Catarina, no Atlântico Sul. No mesmo local do campus, foram registrados dados a partir de um radiômetro padrão (i.e. um pirgeômetro). Estes dados obtidos no LABSOLAR (Laboratório de Energia Solar) do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC foram obtidos em momento quase simultâneo para comparar e avaliar a variabilidade das medições do termômetro infravermelho.

Dados atmosféricos registrados a partir das radiosondagens lançados diariamente por volta das 12:00 UTC (09:00 hora local) do aeroporto de Florianópolis foram usados para estimar a AP e comparar com a variabilidade das temperaturas registradas. Neste caso, a AP pode ser estimada a partir de uma integração vertical dos dados medidos em vários níveis atmosféricos da razão de mistura (i.e. gramas de vapor d'água por unidade de volume de ar seco).

Foram obtidas curvas de tendência estatística entre as temperaturas medidas, os dados do radiômetro e também da AP estimada a partir dos perfis atmosféricos das radiosondagens. A curva de tendência obtida proporcionou uma relação empírica entre a temperatura medida e a AP para dias de céu claro. Essa relação estatística permite estimativas de AP em caso de eventual medição obtida com o termômetro de infravermelho.

3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 02 mostra uma série temporal das temperaturas registradas com o termômetro infravermelho. Os resultados mostram que, em geral, as temperaturas

atmosféricas aparentes são mais altas durante os meses de verão e mais frias durante os meses de inverno. Juntamente com todos os dados registrados, nota-se que durante os dias de céu claro as temperaturas são mais frias, atingindo cerca de $-29\text{ }^{\circ}\text{C}$ em julho de 2015. Os eventos de temperaturas mais altas que chegam a $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ em janeiro representam a presença de nuvens que aumentam a radiação descendente emitida de sua base que está localizada nas camadas mais baixas e mais quentes da atmosfera.

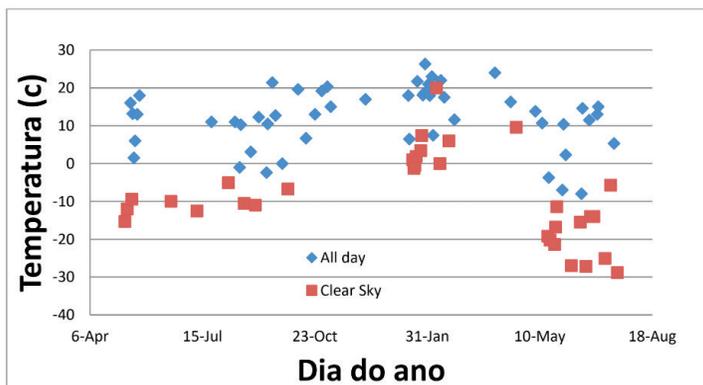


Figura 02 – Série temporal da temperatura atmosférica aparente (C) do céu no zênite medida com o termômetro infravermelho no município de Florianópolis (27,5 S; 48,5 W).

A Figura 03 apresenta uma série temporal da temperatura registrada e sua comparação com a radiação quase simultânea medida com o radiômetro padrão (i.e. pirgeômetro). Os resultados mostram uma evolução muito próxima entre ambas as medidas. Em geral, as medidas de temperaturas mais altas concordam com o forte fluxo de radiação de ondas longas descendentes. Esses resultados mostram que o termômetro infravermelho pode fornecer uma boa estimativa do fluxo de radiação de onda longa descendente medida na superfície.

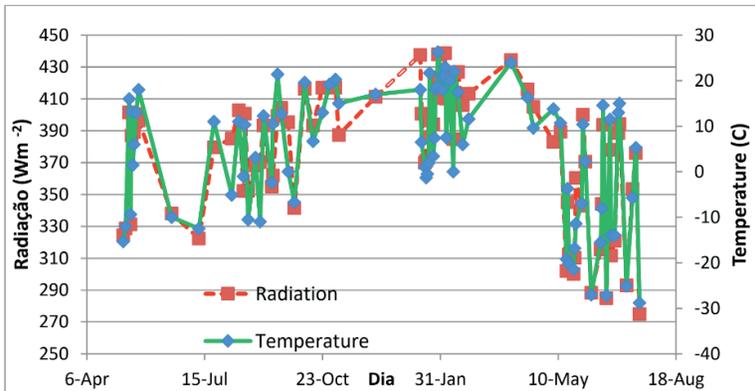


Figura 03 – Intercomparação entre a temperatura atmosférica (C) do termômetro infravermelho e a radiação (Wm^{-2}) registrada a partir de um radiômetro padrão (i.e. pirgeômetro) feita no LABSOLAR da UFSC.

A Figura 04 apresenta a temperatura registrada junto com as medições de radiação e sua curva de tendência. Os resultados mostram uma correlação muito alta ($R^2 = 0,87$) entre o termômetro infravermelho e as medições padrão do radiômetro mostrando novamente que o termômetro de infravermelho pode fornecer uma estimativa muito boa da condição atmosférica não apenas para condições de céu claro, mas também para a presença local de nuvens.

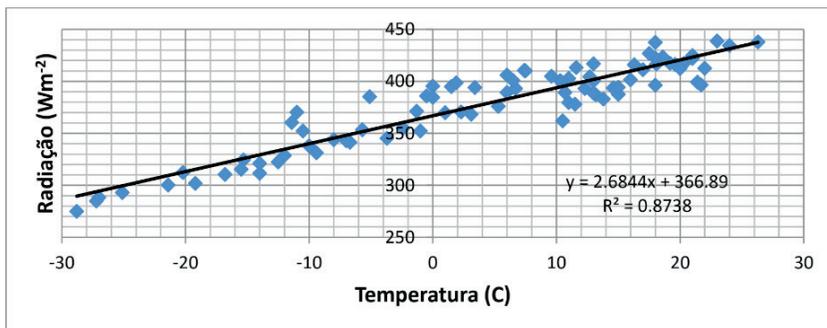


Figura 04 – Correlação entre a temperatura atmosférica (C) do termômetro infravermelho e a radiação (Wm^{-2}) registrada a partir de um radiômetro padrão.

A Figura 05 apresenta a série temporal da AP estimada a partir dos perfis das radiosondas e da temperatura medida com o termômetro de infravermelho. Embora ambos os dados apresentem a variabilidade incluindo o máximo de AP durante os meses de verão e o mínimo durante os meses de inverno, há vários registros discrepantes entre as

medidas. As diferenças ocasionais ocorrem porque os lançamentos de radiosonda são feitos no aeroporto localizado cerca de 7 km ao sul distantes das medições de temperatura feitas in situ no campus da universidade. Além disso, os balões de radiosonda se movem devido ao vento e, portanto, registram dados longe das medições in situ e eventualmente poderão atingir nuvens não observadas no local dos registros de temperatura.

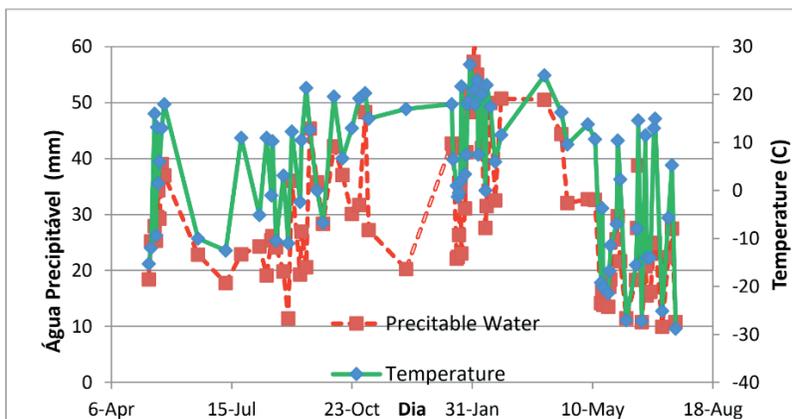


Figura 05 – Série temporal da Água Precipitada (AP) estimada a partir da radiosonda do aeroporto de Florianópolis e medições de temperatura infravermelha para todos os dias às 12:00 UTC (09:00 hora local).

A Figura 06 mostra a relação entre a AP estimada a partir das radiosondas do aeroporto com as temperaturas medidas com o termômetro de infravermelho para todos os dias. Os resultados mostram que, de fato, há uma maior correlação para temperaturas mais baixas que ocorrem durante os dias de céu claro e uma relação mais difusa durante eventos quentes nublados.

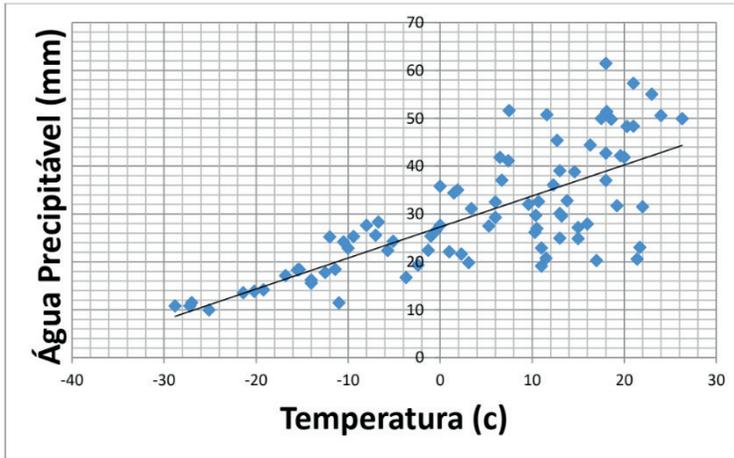


Figura 06 – Correlação entre a Água Precipitada (AP) estimada a partir do rádio do aeroporto de Florianópolis e medições de temperatura infravermelha para todos os dias.

A Figura 07 apresenta as mesmas medidas de AP e temperatura, mas apenas para dias de céu claro. Os resultados mostram uma correlação muito maior ($R^2 = 0,85$) entre as variáveis apresentadas na Figura 06 calculada para todos os dias.

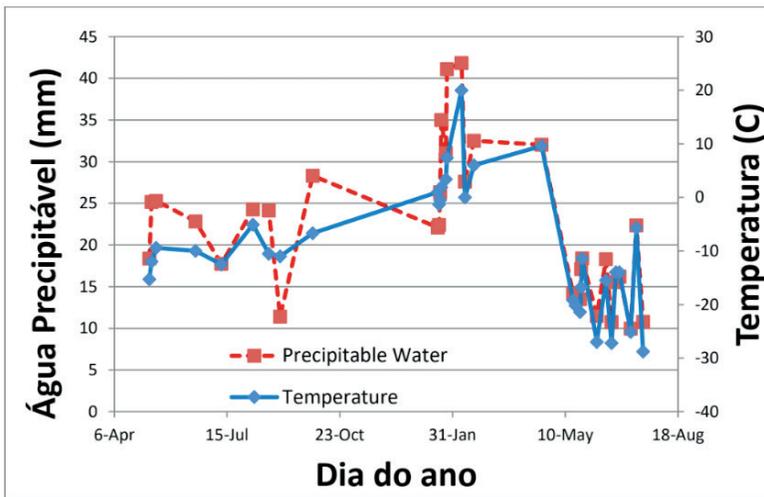


Figura 07 – Série temporal da Água Precipitada (AP) estimada a partir de rádiosondas do aeroporto de Florianópolis e medições de temperatura infravermelha apenas para dias de céu claro.

A curva de tendência obtida (Fig. 08) entre a AP e a temperatura (T) apresenta a seguinte relação empírica:

$$AP = 28.1 + 0.68 T$$

Esta relação empírica permite uma estimativa da AP a partir de medidas de temperatura com o termômetro. Portanto, este termômetro de baixo custo permite estimativas da AP para eventuais casos de céu claro.

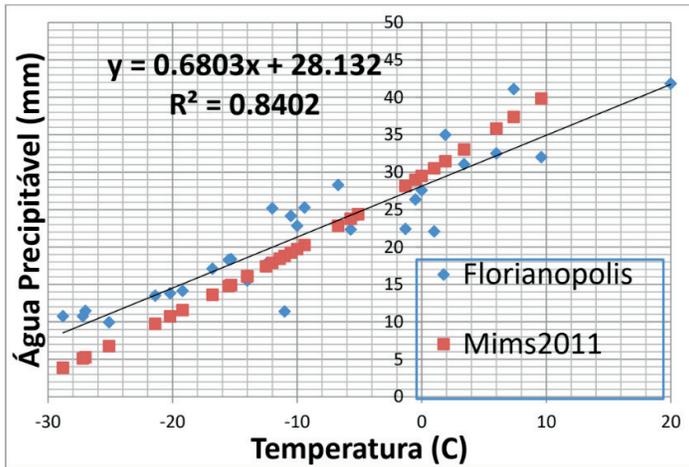


Figura 08 - Correlação entre a Água Precipitada (AP) estimada a partir da radiossonda do aeroporto de Florianópolis e medições de temperatura com termômetro de infravermelho. Comparação com dados obtidos de MIMS et al., 2011 para região do Texas (EUA).

4 | CONCLUSÕES E DISCUSSÃO

Um termômetro infravermelho de baixo custo foi usado para registrar as temperaturas atmosféricas aparentes para um local na cidade de Florianópolis. Os resultados mostram que a série temporal de medições de temperatura se compara muito bem com os registros de um radiômetro padrão. Além disso, há uma correlação muito alta entre as medidas de temperatura e a AP para os dias de céu claro. Uma comparação dessa curva de tendência com a obtida na região do Texas (MIMS et al., 2011) mostra valores ligeiramente mais baixos de AP para aquela região para condições de temperaturas mais frias. Uma vez que nas regiões de latitudes mais baixas (e. g. Florianópolis) a altura da tropopausa é mais alta, espera-se uma maior concentração de AP nessas regiões em comparação com as regiões de latitude mais altas (e.g. Texas). Florianópolis está localizada em uma ilha tropical localizada na latitude de 27,5 °S, enquanto as medidas do Texas foram obtidas na latitude de 29,6 °N. Assim, os resultados mostram que podemos esperar uma relação ligeiramente diferente em função da localização. Esta técnica com uso de termômetro de

infravermelho pode fornecer portanto, uma alternativa barata para estimativas de água precipitável para qualquer localidade e a qualquer instante.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte e ao LABSOLAR da UFSC pelos dados de radiação de onda longa.

REFERÊNCIAS

Bevis, M., S. Businger, T. A. Herring, C. Rocken, R. A. Anthes, and R. H. Ware, 1992: GPS Meteorology' Remote Sensing of Atmospheric Water Vapor Using the Global Positioning System. *J. Geophys. Res.*, **97801**, 715–787, doi:10.1029/92JD01517.

Brooks, D. R., F. M. M., 2001: Development of an inexpensive handheld LED-based Sun photometer for the GLOBE program. *J. Geophys. Res.*, **106**, 4733–4740, doi:10.1029/2000JD900545.

Fowler, F. E., 1912: The spectroscopic determination of aqueous vapor. *Astrophys. J.*, **35**, 149.

Gutman, S. I., and S. G. Benjamin, 2001: The Role of Ground-Based GPS Meteorological Observations in Numerical Weather Prediction. *GPS Solut.*, **4**, 16–24, doi:10.1007/PL00012860.

Kaufman, Y. J., and B.-C. Gao, 1992: Remote sensing of water vapor in the near IR from EOS/MODIS. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **30**, 871–884, doi:10.1109/36.175321.

Liljegren, J. C., 1994: TWO-CHANNEL MICROWAVE RADIOMETER FOR OBSERVATIONS OF TOTAL COLUMN PRECIPITABLE WATER VAPOR AND CLOUD LIQUID WATER PATH. *Fifth Symposium on Global Change Studies*, American Meteorological Society, 262–269.

Liou, K. N., 2002: *An Introduction to Atmospheric Radiation*. Academic Press, 583 pp.

Maghrabi, A., and R. Clay, 2010: Precipitable water vapour estimation on the basis of sky temperatures measured by a single-pixel IR detector and screen temperatures under clear skies. *Meteorol. Appl.*, **17**, 279–286.

Mims, F. M., L. H. Chambers, and D. R. Brooks, 2011: Measuring total column water vapor by pointing an infrared thermometer at the sky. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **92**, 1311–1320, doi:10.1175/2011BAMS3215.1.

Mims Iii, F. M., 1992: Sun photometer with light-emitting diodes as spectrally selective detectors. *Appl. Opt.*, **31**, 6965–6967, doi:10.1364/AO.31.006965.

Pettifer, R., 2009: From observations to forecasts - Part 2. The development of in situ upper air measurements. *Weather*, **64**, 302–308.

Soden, B. J., and J. R. Lanzante, 1995: An assessment of satellite and radiosonde climatologies of upper tropospheric water vapor. *J. Clim.*, **9**, 1235–1250.

Volz, 1974: Economical multispectral sun photometer for measurements of aerosol extinction from .44 microns to 1.6 microns and precipitable water. *Appl Opt.*, **13**, 1732-1733.

CAPÍTULO 3

MOLHABILIDADE EM INTERFACES BINÁRIAS E TERNÁRIAS COMPOSTAS DE CO₂, SALMOURA E ÓLEO, VIA DINÂMICA MOLECULAR CLÁSSICA

Data de aceite: 01/03/2021

Lucas S. de Lara

Departamento de Física - Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG) Ponta Grossa - PR - Brasil

Danilo V. dos Santos

Departamento de Física - Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG) Ponta Grossa - PR - Brasil

Derik W. Gryczak

Departamento de Física - Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG) Ponta Grossa - PR - Brasil

Taiza A.S. do Carmo

Departamento Acadêmico de Matemática - Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) Ponta Grossa - PR - Brasil

Alexandre C. Junior

Departamento de Física - Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG) Ponta Grossa - PR - Brasil

Andressa Novatski

Departamento de Física - Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG) Ponta Grossa - PR - Brasil

RESUMO: Em nosso trabalho estudamos via Dinâmica Molecular Clássica (MD) as propriedades termodinâmicas em sistemas binários e ternários compostos por óleo leve,

CO₂ e salmoura para aplicações envolvendo recuperação melhorada de petróleo (RMP). Assumimos dois tipos de interfaces: binárias, onde estamos interessados na difusão das moléculas de CO₂ por uma camada variável de H₂O ou salmoura, e atingir a fase contendo um modelo de óleo; e as ternárias, tal que tanto as moléculas de CO₂, quanto a H₂O ou salmoura fazem interface com o óleo. A partir dos perfis de densidade para sistemas binários, foi observado um acúmulo de moléculas aromáticas próximo à interface de acordo com a espessura da camada de salmoura, mas nos sistemas ternários esse acúmulo não é observado devido à alta difusividade de CO₂ na interface direta com o óleo. Quando a espessura da camada de salmoura é maior que 4,0 nm, nossos cálculos indicam um aumento na tensão interfacial salmoura/óleo tanto com o aumento da pressão como pela concentração de sal. Para valores menores na espessura da camada de salmoura, a tensão. Estimamos também a diminuição na ordem de 30% para a densidade da mistura óleo + CO₂ para sistemas ternários, quando comparada à densidade do óleo leve. Além disso, a salinidade é responsável pela estabilização da interface (óleo+CO₂)/salmoura na formação das emulsões o/a.

PALAVRAS - CHAVE: molhabilidade, interfaces, dinâmica molecular, recuperação melhorada de petróleo, emulsões.

ABSTRACT: In our work we studied by Classical Molecular Dynamics (MD) the thermodynamic properties in binary and ternary systems composed of crude oil, CO₂ and brine fluids for

the applications involving enhanced oil recovery (EOR). We assume two types of interfaces: binary, where we are concerned with the diffusion of the CO₂ molecules by a variable layer of H₂O or brine when achieve the oil phase; and ternary, such that both the CO₂ molecules, as to the H₂O or brine interface with the oil. From the density profiles for binary systems, an accumulation of aromatic molecules close to the interface was observed according to the thickness of the brine layer, but in the ternary systems such accumulation is not observed due to the high CO₂ diffusivity at the oil interface. When brine layer thickness is greater than 4.0 nm, our calculations indicate an increase in the interfacial tension brine/oil with increasing pressure and salt concentration, but close to the interfaces containing CO₂ and brine/oil the interfacial tension decreases with increasing pressure and salt concentration. We also estimate the decrease in order of 30% for the density of the mixture oil+CO₂ for ternary systems, when compared to the light oil density modeled in this work. In addition, salinity is responsible for the stabilization of the (oil+CO₂)/brine interface on the formation of the w/o emulsions.

KEYWORDS: Wettability, ternary interface, molecular dynamic, light oil, enhanced oil recovery, emulsion.

1 | INTRODUÇÃO

A complexidade exigida nas técnicas de extração e exploração de petróleo de um reservatório é muito elevada e requer altos conhecimentos e estratégias em técnicas nas diferentes áreas da engenharia aplicada. Por considerar diversas variáveis termodinâmicas a serem incorporadas aos métodos atuais, as investigações em escala molecular acabam merecendo grande atenção [1-4]. Essas variáveis são classificadas de acordo com meios geológicos, pressão do reservatório de óleo, gás e ou composição da água, viscosidade do petróleo bruto (densidade API), migração fina, conteúdo e composição de água, potencial de corrosão, concentração de gás, concentração de asfalto e parafina, entre outros. percebe-se que dentro dessas considerações, a presença de água é determinante (por exemplo, corrosão e emulsão) e geralmente ligada aos processos envolvidos na extração via interação de fluidos miscíveis/imiscíveis [5-9]. Sabe-se que tais interfaces são extremamente pequenas, da ordem do comprimento molecular, de modo que muitas medidas experimentais acabam sendo limitadas principalmente quando aplicadas a fluidos. [10-15]. Em processos que envolvem misturas de fluidos, as identificações das contribuições de cada componente acabam sendo gerais e não esclarecem completamente os mecanismos moleculares envolvidos na dinâmica de interação entre interfaces de tais sistemas [16].

O grande interesse no estudo de interfaces se reflete em técnicas de recuperação melhorada de petróleo (RMP) uma vez que o contato entre os fluidos é observado, onde grande parte do óleo contido nos reservatórios requer métodos alternativos de injeção de fluido [17] como uma primeira extração direta, tomando vantagem das propriedades umectantes entre os fluidos [18]. Sabe-se que a redução da tensão interfacial (IFT) ou

viscosidade do petróleo bruto por diferentes processos moleculares, envolvendo, por exemplo, misturas de fluidos, é o principal mecanismo dos processos RMP, uma vez que tais propriedades têm sua origem na interface óleo/fluido [19-21].

Os fluidos podem ser injetados em reservatórios de óleo por diferentes razões, como para manter a pressão do reservatório para melhor recuperação de óleo ou mesmo para tornar o óleo menos viscoso, promovendo um ganho na extração de óleo devido à dissolução do óleo em tais fluidos. Dentre os fluidos utilizados, a salmoura é o método mais comum de aplicação em reservatório devido à sua disponibilidade e manuseio. Outro fluido amplamente utilizado na recuperação de óleo [22,23] é o CO_2 , principalmente por seus interesses ambientais, proporcionando uma alternativa ao lançamento na atmosfera, por meio de sua movimentação para o reservatório de óleo [24]. Além disso, os aquíferos salinos podem se beneficiar do CO_2 armazenado no ciclo do carbono.

Durante o processo de injeção imiscível de fluidos, o CO_2 é injetado na formação rochosa por meio da mobilização do óleo e sua movimentação para o poço de produção, uma vez diluído em óleo e posteriormente dilatado. [25]. Isso representa uma mobilidade melhorada do óleo devido à solubilidade de CO_2 no óleo, o que causa redução na viscosidade e diminuição da tensão interfacial [26]. Os principais processos imiscíveis em CO_2 incluem principalmente a injeção alternada de $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ e a injeção contínua de fluidos de CO_2 . A injeção alternada de $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ parece ser mais eficiente em aumentar a recuperação de óleo pesado, embora o fator de recuperação ainda seja baixo [27, 28]. Uma alternativa é o uso de salmoura alternada com CO_2 em reservatórios de petróleo e gás esgotados, onde normalmente há uma grande quantidade de salmoura após a inundação de H_2O [29]. Isso leva à formação de salmoura em um sistema ternário,

Portanto, o conhecimento do equilíbrio de fases nas misturas aquosas com hidrocarbonetos acaba sendo importante nos processos de recuperação de óleo. Conhecer a solubilidade e a volatilidade dos hidrocarbonetos é necessário para descrever sua distribuição de fases ao longo do processo de separação ou para auxiliar no projeto do equipamento de separação. Esta solubilidade mútua é amplamente dependente do comprimento da cadeia de hidrocarboneto e da presença de grupos polares, como funcionalidades aromáticas.

Do ponto de vista da modelagem molecular em simulações computacionais, as misturas de H_2O , óleo leve e CO_2 são desafiadoras devido às complexidades das interações entre os componentes que resultam em um comportamento muitas vezes fora do equilíbrio termodinâmico. Enquanto os modelos de óleo leve têm propriedades apolares, o CO_2 tem um momento de quadrupolo alto e H_2O tem um grande momento de dipolo, ao mesmo tempo que possui ligações de hidrogênio. As misturas são, portanto, altamente assimétricas, tanto em termos de tamanho molecular quanto de interações de energia [32]. Na verdade, estudos muito limitados são observados para o sistema ternário $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ -óleo, especialmente o comportamento microscópico da distribuição das moléculas de

CO₂ na interface, as propriedades estruturais e dinâmicas da interface H₂O/óleo são pouco relatadas para seus mecanismos de ação [33].

Diante da complexidade em se efetivar simulações computacionais em sistemas ternários H₂O-CO₂-óleo, neste trabalho, usando simulações de dinâmica molecular clássica (MD), determinamos propriedades termodinâmicas como perfil de densidade, tensões interfaciais, carga cumulativa e coeficientes de difusão em condições típicas em reservatórios com o objetivo de investigar os efeitos da injeção alternada de CO₂ e salmoura em relação a sua interface com o óleo. Portanto, efeitos como a espessura da camada de salmoura presente entre o CO₂ e o óleo foram investigados pelos efeitos do aumento da concentração e da pressão do sal. Além disso, consideramos interfaces duplas (sistemas ternários) com o óleo contendo CO₂ e salmoura ou H₂O, cujo objetivo é analisar o comportamento da alta miscibilidade de CO₂ quando em conjunto com as interações de H₂O e salmoura.

2 | METODOLOGIA

Simulações de dinâmica molecular (MD) foram utilizadas para investigar o comportamento interfacial do CO₂-salmoura-óleo (interfaces binárias e ternárias). Potenciais interatômicos precisos foram usados: moléculas de H₂O foram descritas usando potencial SPCE / FH [34]. Os íons Na, Ca e Cl são descritas apenas por termos de van der Waals e Coulomb, onde esses parâmetros potenciais também são encontrados na Ref. [34]. Diferentes concentrações de sal foram consideradas de acordo com (NaCl/CaCl₂)% de concentrações: (8,0/2,0), (6,4/1,6) e (4,0/1,0)%. Para moléculas de CO₂ foi modelado usando o método de ligações flexíveis [35], que é baseado no modelo EPM2 originalmente rígido. Para o modelo de petróleo bruto, consideramos oito tipos de hidrocarbonetos: alcanos [144 Hexano (HEX), 132 Heptano (HEP), 156 Octano (OCT), 180 Nonano (NON), 96 Cicloexano (CHEX), 156 Cicloheptano (CHEP)] , moléculas aromáticas [156 tolueno (TOL) e 60 benzeno (BEN)]. Hidrocarbonetos foram descritos usando campos de força baseados em CHARMM [36].

As caixas de simulações para os sistemas isolados (H₂O ou salmoura, CO₂ e modelo de óleo) foram configuradas como uma caixa cúbica de dimensões $L_x \times L_y \times L_z$ e o total de moléculas pode ser visto na tabela 1 de acordo com as diferentes espessuras (L_z) para a salmoura e o CO₂.

Espessura ou L_z para H₂O (salmoura) (nm)	Espessura ou L_z para CO₂ (nm)	Moléculas de H ₂ O	Moléculas de CO ₂
2,0	4,0	6098	4640
2,5	5,0	7613	5808
3,0	6,0	9125	6970
4,0	8,0	12180	9284
5,0	10,0	15221	11609

Tabela 1: Moléculas totais na interface binária de fluido/óleo de acordo com a espessura L_z do fluido.

Aqui ($L_x \times L_y$) = (10,0 nm × 10,0 nm) para todos os sistemas isolados e o valor inicial para L_z no modelo de célula de óleo é $L_z = 10,0$ nm. Uma sequência de cálculos NVE (conjunto microcanônico), NVT (conjunto canônico) e NPT (conjunto isotérmico-isobárico) foram realizados para obter as densidades de equilíbrio para cada um desses fluidos em um conjunto de pressões e temperaturas de 150 e 300 atm, e, 300 K respectivamente.

Neste protocolo de cálculo, para cada sistema, executamos cálculos na duração de 1,0 ps no conjunto NVE, 10,0 ps no conjunto NVT e 20,0 ns no conjunto NPT. As condições de contorno periódicas foram aplicadas para todos os sistemas e interações eletrostáticas de longo alcance, assim como o método do espaço recíproco Particle Particle Particle-Mesh (PPPM) [37-39]. Em todos os cálculos, um intervalo de tempo de 0,5 fs e raio de corte de 12,0 Å foi usado para as interações de van der Waals. A temperatura e a pressão foram controladas pelo termostato Nose-Hoover e pelo barostato Andersen, respectivamente.

As interfaces binárias fluido/óleo foram construídas considerando os sistemas isolados equilibrados e assumindo a seguinte nomenclatura: (H₂O ou Salmoura)/CO₂/óleo. O mesmo protocolo usado para os fluidos puros foi utilizado aqui. Após o equilíbrio, foram realizadas por 80,0 ns em NVT. Nesta etapa, foram calculados os perfis de densidade, tensão interfacial entre esses sistemas, propriedades de difusão (perfil de autodifusão e perfil de difusão).

Na Figura 1 foi mostrada a configuração inicial de algumas interfaces binárias fluido/ óleo. Além da interface binária apresentada pelas Figuras 1(a) e 1(b), consideramos uma interface ternária composta por CO₂ e salmoura com interface com o óleo, com a nomenclatura: (H₂O ou Salmoura)+CO₂+óleo, conforme mostrado na Figura 1(c). Aqui foi definido como uma caixa cúbica com dimensões $L_x \times L_y = 5,0$ nm × 5,0 nm e $L_z = 10,0$ nm para salmoura e moléculas de CO₂. Para o modelo de óleo, as dimensões definidas como 10,0 nm × 10,0 nm × 10,0 nm. Todos os cálculos de MD foram realizados usando o pacote Large Atomic/Molecular Massively Parallel Simulator (LAMMPS) [40].

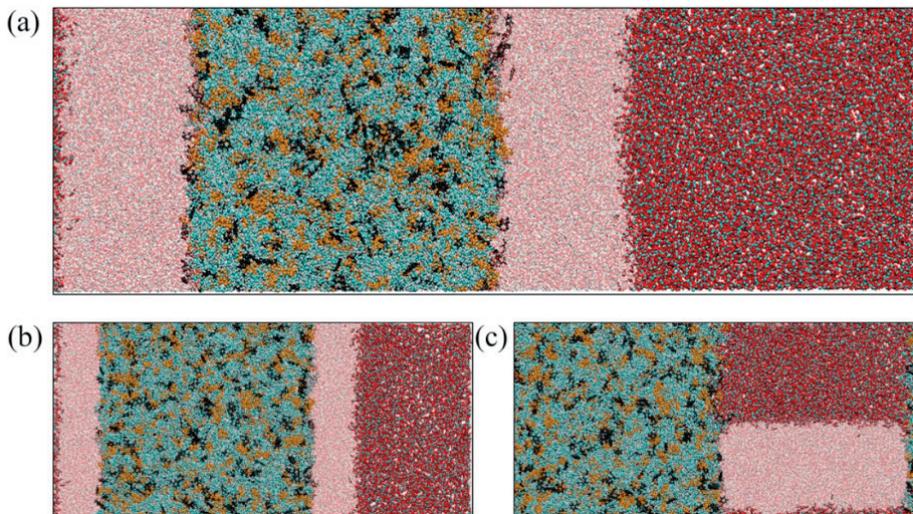


Figura 1: Configuração inicial das interfaces binárias (H_2O ou Salmoura)/ CO_2 /óleo (após a fase de equilíbrio). Espessura (L_z) para a salmoura e fluidos de CO_2 : (a) 5,0 e 10,0 nm; (b) 2,5 e 5,0 nm, respectivamente. (c) Interfaces ternárias (H_2O ou Salmoura)+ CO_2 +óleo. Todas as configurações em 150 atm e 300K.

Usamos a descrição em termos de tensores de pressão para os cálculos de tensão interfacial usando os mesmos procedimentos vistos em [35,38].

$$\gamma = \frac{1}{2} \int_{-L_b}^{L_a} dz (p_{ab}(z) - p_T(z)), \quad (1)$$

onde, as distâncias L_a e $-L_b$ determinam os limites da região interfacial, e $p_T(z)$ e $p_{ab}(z)$ são os componentes tangencial e normal do tensor de pressão, respectivamente.

Todos os valores do coeficiente de difusão (D) apresentados aqui foram calculados usando a relação de Einstein, de acordo com a qual o coeficiente de difusão é calculado a partir do deslocamento quadrático médio:

$$D = \frac{1}{6} \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\langle (r_i(t) - r_i(0))^2 \rangle}{t}, \quad (2)$$

onde $r_i(t)$ é a posição desdobrada dos átomos i no tempo t , e os colchetes indicam uma média do conjunto, sobre todas as moléculas de soluto e todas as origens temporais.

Também realizamos uma análise eletrostática dos sistemas, com o objetivo de calcular a carga iônica líquida cumulativa $Q(r)$ nas interfaces de salmoura/(CO_2 +óleo) de

acordo com,

$$Q(r) = \int_0^r [c_+(r) - c_-(r)] dr, \quad (3)$$

onde $c_+(r)$ ou $c_-(r)$ são a distribuição de carga positiva ou negativa, respectivamente, definida por $c_{\pm}(r) = q_{\pm}(r) \rho / NR^3$. R é o raio máximo para o sistema, definido com a origem localizada no centro de massa da gota cilíndrica de salmoura, $r = (z^2 + y^2)^{1/2}$ com (z, y) coordenadas cartesianas para átomos, N é o número de configurações nas simulações e l é o número de camadas [41].

3 | RESULTADO E DISCUSSÕES

3.1 Fluidos binários

Inicialmente apresentamos resultados para as interfaces binárias representadas nas Figuras 1(a) e 1(b), analisando o comportamento da água ou salmoura quando se forma uma película ao redor do óleo evitando o contato direto CO_2 -óleo. Para esses filmes, consideramos um estudo sistemático sobre sua variação de comprimento descrito por nossos modelos conforme a Tabela 1. O objetivo é verificar a permeabilidade do CO_2 pelo filme de água ou salmoura até atingir a fase oleosa e como o CO_2 altera as propriedades de molhabilidade da H_2O -óleo nestes sistemas.

Nas Figuras 2((a) a (d)), mostramos o perfil de densidade $2d$ ao longo da direção perpendicular à interface (eixo z) para interface binária de fluido/óleo a 300 K e 150 atm com 5,0 nm de espessuras para os sistemas de salmoura. De acordo com [26], foi demonstrado que em uma interface imiscível fluido/óleo ocorre acúmulo de moléculas aromáticas nesta interface. Porém, percebe-se que no sistema que contém mais o componente CO_2 , ocorre uma dispersão de moléculas aromáticas na fase aquosa, enquanto as demais moléculas, predominantemente de moléculas de alcano, permanecem na fase oleosa, ver Figura 2(a) e 2(b).

Além da permeabilidade das moléculas aromáticas, a permeabilidade das moléculas de CO_2 (Figura 2 (c)), não se mostra através da fase aquosa, não atingindo também a região oleosa. Para a densidade total de todos os fluidos, de forma a considerar também os efeitos da salinidade, apresentamos na Tabela 2 os valores correspondentes de acordo com a espessura da camada de salmoura. Em termos das concentrações máxima (8,0/2,0%) e mínima (4,0/1,0%) dos sais $\text{NaCl} / \text{CaCl}_2$, observamos uma variação da densidade da salmoura a 150 e 300 atm de $(0,99 \pm 0,02) \text{ g/cm}^3$ e $(1,01 \pm 0,02) \text{ g/cm}^3$ respectivamente. Esses valores são valores típicos para água do mar. Para a densidade de CO_2 , considerando as variações de espessura da camada de H_2O pura a 300K sob pressão de 150 e 300 atm o valor foi estimado em $(0,85 \pm 0,02) \text{ g/cm}^3$ (Figura 2 (c)) e $(0,92 \pm 0,02)$

g/cm³, respectivamente.

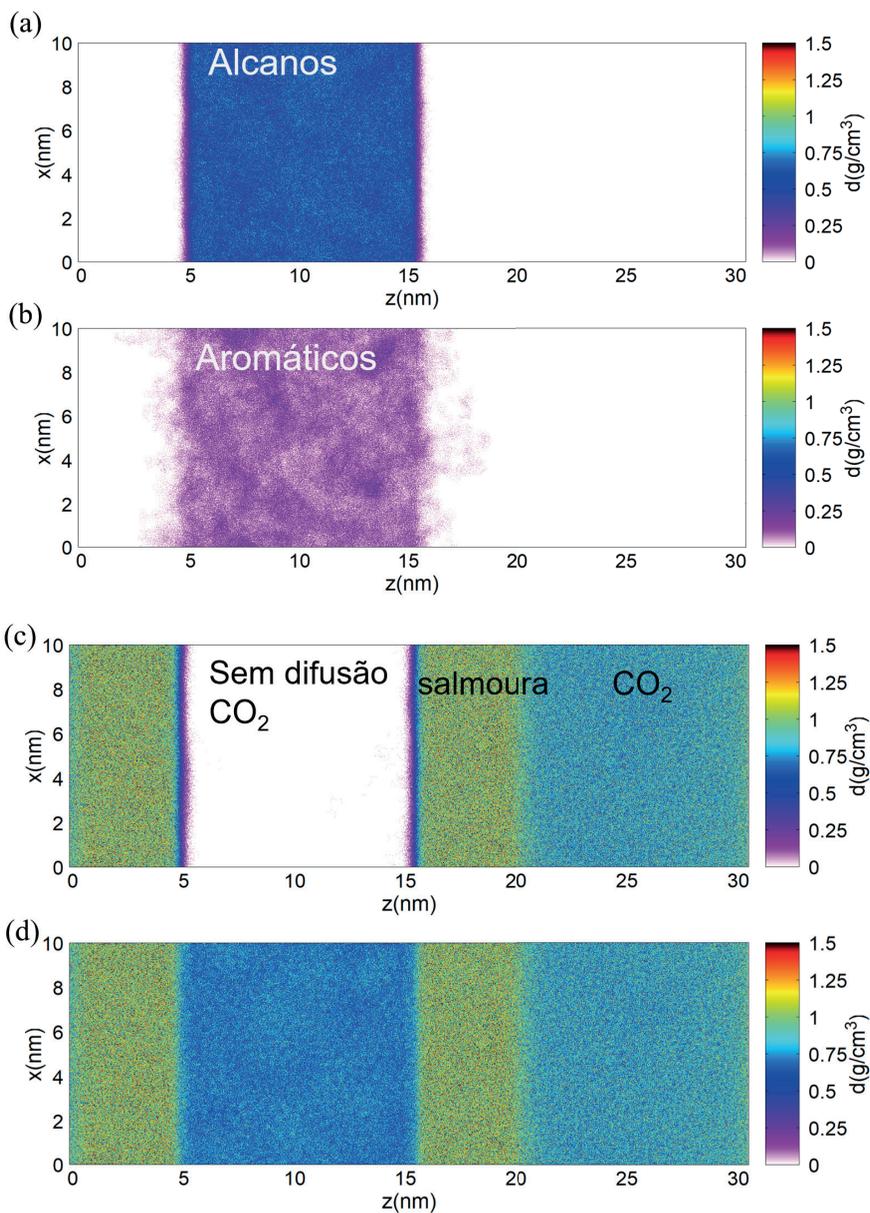


Figura 2: Perfil de densidade de acordo com o espessura do fluido: 5,0 nm de soluções de salmoura (8,0/2,0%) NaCl/CaCl₂; (a) Apenas moléculas de alcano, (b) Moléculas aromáticas, (c) Salmoura+CO₂, sem difusão de CO₂ na fase oleosa, e, (d) Sistema Total. Interfaces a 300K e 150 atm.

Para o nosso modelo de óleo, a densidade foi estimada em $(0,76 \pm 0,02)$ g/cm³ e $(0,72 \pm 0,02)$ g/cm³ assumindo os valores máximo e mínimo respectivamente, da salinidade da salmoura, todos a 150 atm. À 300 atm, uma mudança significativa nos valores da densidade do óleo é observada devido à permeabilidade das moléculas aromáticas na H₂O pura ou na fase de salmoura, $(0,73 \pm 0,02)$ g/cm³ e $(0,70 \pm 0,02)$ g/cm³, respectivamente.

Os resultados obtidos para os perfis de densidade de todos os sistemas binários foram compatíveis com os experimentais [42-45]. É possível verificar que os potenciais utilizados para a modelagem desses sistemas nas simulações de dinâmica molecular foram eficientes na captura da informação termodinâmica devido às interações entre as três fases (óleo-(salmoura ou H₂O)-CO₂).

Espessura ou L_z do H ₂ O (salmoura) (nm)	Densidade (g/cm ³) de acordo com a salinidade (NaCl / CaCl ₂ %) a 300K e 150atm		
	(4,0/1,0)	(6,4/1,6)	(8,0/2,0)
2,0	0,970	0,983	1,008
2,5	0,970	0,986	1,007
3,0	0,972	0,993	1,013
4,0	0,974	0,996	1,013
5,0	0,977	0,993	1,011
	Densidade (g/cm ³) em 300K e 300 atm		
2,0	0,983	0,999	1,012
2,5	0,986	1,004	1,017
3,0	0,985	1,007	1,016
4,0	0,987	1,007	1,017
5,0	0,988	1,008	1,018

Tabela 2: Densidades de salmoura na interface binária fluido/óleo de acordo com a espessura.

Em relação à estabilidade da fase, ou seja, a imiscibilidade dos fluidos envolvidos, o aumento da concentração de sal promove uma separação de fases mais estável quando analisadas espessuras da camada de salmoura maiores que 3,0 nm. Considerando as diferentes espessuras, existe uma diferença na penetração das moléculas de CO₂ na salmoura, mas a fração no número total de moléculas de CO₂ é baixa, variando de 0,1 a 1,0%. Também é observado um pequeno comportamento de acúmulo de moléculas de CO₂ na região de interface com H₂O e salmoura (Figura 3), sendo mais intenso em soluções de H₂O com espessura de 2,0 nm.

No caso da água pura (H₂O), também temos um leve acúmulo de CO₂ na interface. Para as concentrações mais altas de NaCl e CaCl₂, o acúmulo de CO₂ não é significativo. A fim de investigar o acúmulo e a permeabilidade de CO₂ na interface com H₂O ou salmoura, consideramos um zoom na região da interface (H₂O ou salmoura)/CO₂ e mostrado na Figura 3.

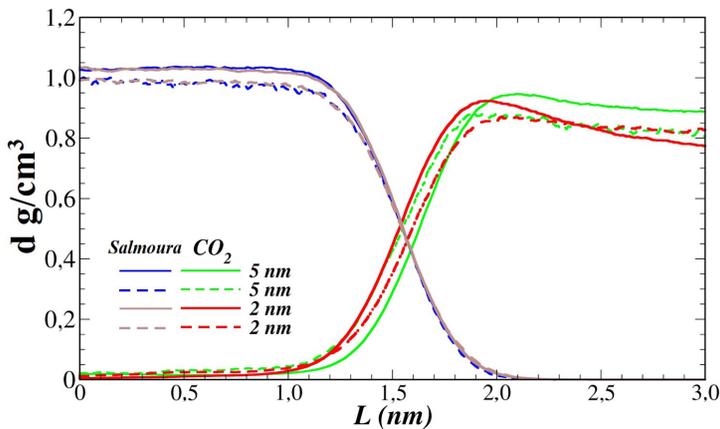


Figura 3: Zoom no perfil de densidade de fluidos em um sistema para diferentes espessuras e concentrações de sal a 300K e 150 atm. Linha completa: Salmoura [H₂O+(8,0/2,0%) NaCl/CaCl₂]; Linha pontilhada: H₂O puro. Com 5,0 nm de espessuras para os sistemas de salmoura e H₂O puro. L é a espessura da região centrada na interface.

Para verificar os efeitos do acúmulo de moléculas nas interfaces CO₂/(H₂O ou salmoura)/óleo, estimamos valores da tensão interfacial salmoura/óleo de acordo com a espessura da camada de H₂O (ou salmoura), nos sistemas de interface binária, pressão e concentração de sal, mostrada na Figura 4.

Observa-se que a espessura da camada de H₂O ou salmoura influencia os valores de tensão interfacial (H₂O ou salmoura)/interface óleo. Esses resultados corroboram os obtidos para os perfis de densidade, pois quanto menor a espessura da camada, maior é a influência das interações entre as moléculas de CO₂ e o óleo. A explicação está relacionada à redução da tensão interfacial para espessura inferior a 3,0 nm, pelo fato de haver uma certa difusão de moléculas de CO₂ na fase H₂O, reduzindo a tensão interfacial do (H₂O ou salmoura)/óleo. Supõe-se então que com o acúmulo de moléculas de CO₂ na interface com H₂O ou salmoura sendo apenas um resultado das diferenças entre a tensões interfaciais, CO₂/H₂O e óleo/H₂O como visto em [46], embora os efeitos do H₂O ou espessura da camada de salmoura, acabam eliminando essas propriedades interfaciais.

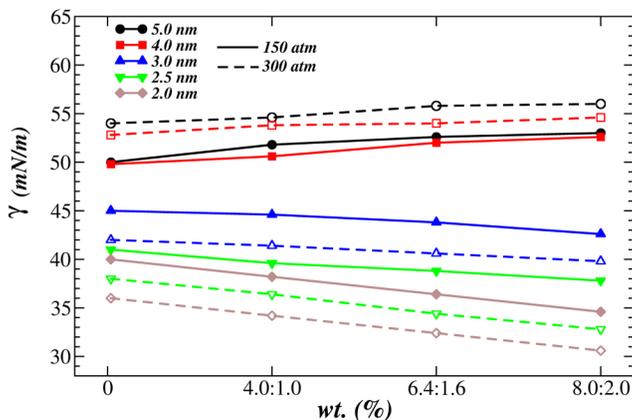


Figura 4: Tensão interfacial para as interfaces binárias fluido/óleo. A tensão interfacial depende da salinidade e das diferentes pressões a 300K.

Quando as interfaces $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ e óleo/ H_2O estão próximas o suficiente, temos o acúmulo e assim resultando na diminuição da tensão interfacial, mas para interfaces distantes a regra é o contrário. Aqui, a tensão interfacial aumenta com o aumento da concentração de sal e pressão, quando a camada de salmoura possui espessura superior a 4,0 nm, enquanto para espessura inferior a 3,0 nm, a tensão interfacial diminui com aumento da concentração de sal e pressão [47-50]. Nossos resultados concordam com a teoria e experimental [13, 50].

Além de obter os valores de tensão interfacial para as interfaces bifásicas, analisamos a difusividade de H_2O (ou salmoura) e CO_2 em suas fases bulk e em direção à fase oleosa em condições de pressão e salinidade. Em nossas simulações, foi observada a difusividade das moléculas de CO_2 em todos os sistemas estudados, a partir da suposição de diferentes espessuras de H_2O ou salmoura entre as fases de CO_2 e oleosa, bem como nas interfaces diretas de CO_2 e H_2O (ou salmoura) com as moléculas de óleo.

Para quantificar a difusão das moléculas envolvidas nos sistemas apresentamos os resultados para os fluidos de injeção onde o coeficiente de difusão para cada ponto de estado foi calculado a partir de 20 simulações diferentes de 1,0 ns, ao longo da simulação realizada. As propriedades de transporte e os perfis de difusão ao longo da interface entre fluidos binários e, finalmente, comparando o comportamento desses sistemas na interface fluido-óleo de acordo com a espessura das camadas de H_2O (ou salmoura). Assim, para compreender o efeito da interface fluido-óleo nas propriedades de transporte dos componentes, a variação do coeficiente de difusão (ao longo da direção perpendicular às interfaces fluido/óleo) foi monitorada em função da pressão e salinidade a 300K (Figura 5). Para todos os fluidos considerados,

Para o sistema de interface (H_2O ou salmoura)/óleo, espessuras entre 2,0 e 5,0 nm,

os efeitos da salinidade no perfil de difusão não foram significativos quando comparados ao caso H_2O /óleo puro, mesmo em um sistema com pressão crescente. Com o aumento da concentração de sal, a solução é menos miscível com óleo, mas as propriedades de transporte não são afetadas em comparação com a interface H_2O /óleo puro. No entanto, o efeito da espessura da camada de H_2O que separa o CO_2 do óleo é relevante. Comparando as Figuras 5(a) e 5(c), a difusividade, pela menor espessura de H_2O , é até 5 vezes maior do que no caso de espessura maior.

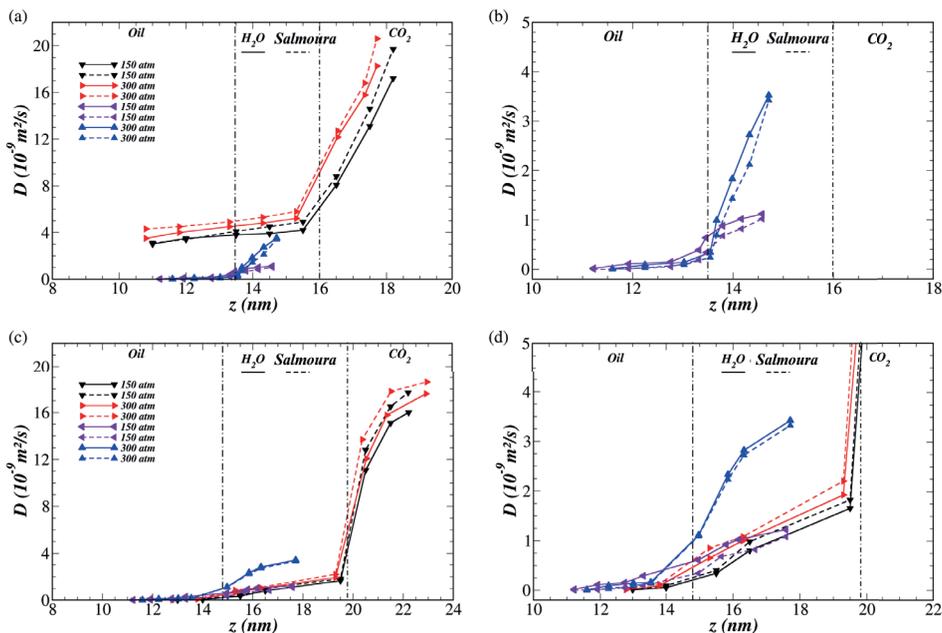


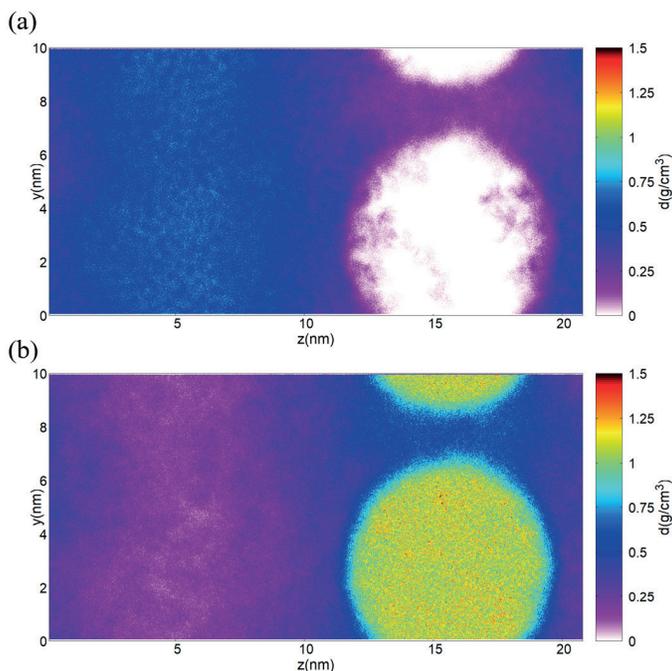
Figura 5: Perfil de difusão de acordo com espessura do fluido: 2,0 nm (a) H_2O (linhas completas) e Salmoura $H_2O+(8,0/2,0\%) NaCl/CaCl_2$ (linhas pontilhadas); 5,0 nm (c) H_2O e Salmoura $H_2O+(8,0/2,0\%) NaCl/CaCl_2$. No sistema foram consideradas as moléculas de CO_2 à 300K e 150 atm. As figuras (b) e (d) são zooms de (a) e (c), respectivamente.

Colocando estes resultados em perspectiva, para os fluidos binários, as simulações sugerem uma diminuição da tensão interfacial e aumento da difusão do fluido na fase oleosa com o aumento da pressão quando a espessura da camada de H_2O ou salmoura for inferior a 3,0 nm. Em suma, para esses sistemas, quanto menor a tensão interfacial, maior é a penetração do fluido na fase oleosa. Por outro lado, para salmoura (espessura maior que 4,0 nm)/interface óleo, nossos cálculos indicam um aumento na tensão interfacial com o aumento da pressão e concentração de sal [51-56].

3.2 Fluidos ternários

Para as interfaces ternárias ((H₂O ou salmoura)+CO₂/óleo), assumindo a configuração inicial da Figura 1(c), estimamos os perfis de densidade para todos os sistemas. A Figura 6 mostram os resultados para H₂O pura e salmoura (8,0/2,0%) NaCl/CaCl₂). Observamos imediatamente uma alta concentração de CO₂ na região contendo óleo (o óleo é omitido nas Figuras 6 (c)), devido à alta miscibilidade do CO₂ com o óleo. Os resultados mostram as mudanças nos perfis de densidade de CO₂ quando misturados com óleo. Comparando os dois casos na Figura 5, o pico de densidade de H₂O puro é 0,06 g/cm³ maior do que para a salmoura na posição de 16,0 nm no eixo z da caixa computacional.

Percebe-se também que durante a miscibilidade do CO₂ em óleo, tanto H₂O quanto salmoura apresentam uma simetria tipo emulsão, devido ao contato de H₂O ou salmoura com o novo sistema de óleo+CO₂ e, também, um maior número de moléculas de CO₂ no sistema contendo H₂O puro quando comparado aos casos com salinidade. Na verdade, o último argumento é consistente com os efeitos da tensão interfacial estimada em [57,58], onde realizaram simulações de DM para o CO₂ supercrítico/NaCl, CO₂-Sistemas de solução mista de CaCl₂ e CO₂/(NaCl + CaCl₂) a 343 K e 20 MPa sob diferentes salinidades (força iônica). Neste caso, o efeito da salinidade demonstrou a estabilidade da solução salina aumentando a tensão interfacial de CO₂ com o discreto aumento da concentração salina.



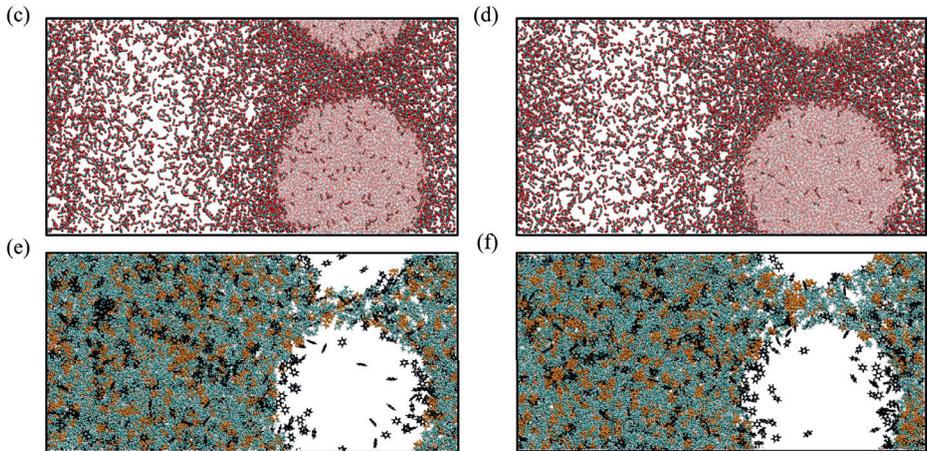


Figura 6: Perfil de densidade para interface ternária ((H₂O ou salmoura)+CO₂/óleo); (a) Somente o óleo e (b) Salmoura (8,0/2,0%)/CO₂; Configuração final para (c) H₂O+CO₂/óleo e (d) Salmoura+CO₂/óleo, onde as moléculas de óleo são omitidas; (e) e (f) moléculas de óleo em relação a (c) e (d), respectivamente. Todas as interfaces a 300K e 150 atm. É possível observar uma alta difusão de CO₂ no óleo e H₂O (ou salmoura) para todas as concentrações e pressões estudadas.

Em relação à tensão interfacial CO₂/óleo, procuramos explorar a influência das soluções salinas em reduzir ou aumentar a tensão interfacial de acordo com o processo de difusão. Com o erro envolvido nos cálculos da tensão interfacial na ordem de 0,1 mN/m, apresentamos os resultados de nossas simulações na Tabela 4. Observe uma ligeira variação na tensão interfacial CO₂/óleo na fase ternária onde, com a presença de H₂O puro a variação foi de 0,5/0,4 mN/m quando analisado sob pressões de 150/300 atm. Com a presença de salinidade, nossas simulações mostraram uma variação de 1,9/1,7 mN / m, para nossa maior concentração salina estudada.

Fluido na interface de óleo	γ (Este trabalho) (mN / m)	γ (Experimental) (mN / m)
CO ₂	5,0/4,4 (H ₂ O)	22,0 - 1,0 [59,60] **
	6,4/5,7 (salmoura) *	23,0 - 1,0 [61] ***

* - Salmoura: 8,0/2,0% NaCl/CaCl₂. ** - na interface decano; faixa de pressão: 1-200 atm a 300K. *** - na interface de petróleo bruto: faixa de pressão: 1-300 atm a 300K e 331K.

Tabela 4: Tensão interfacial nas interfaces CO₂/óleo de acordo com os sistemas de interface ternária a 300K e 150/300 atm

No trabalho experimental desenvolvido em [62], foi demonstrado que em um sistema de salmoura-CO₂, a molhabilidade diminui quando comparada com H₂O-CO₂ puro em um sistema composto pela salmoura e a superfície de uma agulha, que fornecem gotículas de

CO₂ na mesma. Em outro trabalho [63], foram estudadas medições de ângulo de contato de equilíbrio de CO₂-salmoura-óleo-sistemas de rocha mostrando aumento da tensão interfacial com o aumento da pressão, em temperatura constante. Isso é atribuído a uma maior solubilidade de CO₂ em uma pressão mais alta. Este ângulo de contato pode ser interpretado em termos de tensão interfacial CO₂/óleo que neste caso se dá uma redução na tensão interfacial com o aumento da pressão corroborando com os cálculos teóricos.

Percebe-se que a salinidade mostrou ser capaz de alterar levemente a tensão interfacial CO₂/óleo na fase ternária. Podemos dizer que os materiais iônicos adsorvidos (sais) não causam grandes mudanças na tensão interfacial e podem aumentá-la em alguns casos dependendo do tipo de interface formada em um sistema ternário, mas isso faz pouco para facilitar a emulsificação. No entanto, sob condições apropriadas, tais sais podem ajudar a estabilizar o sistema, criando uma barreira eletrostática fina entre as gotículas de fase dispersa e alterando algumas propriedades físicas locais do sistema como a constante dielétrica, a viscosidade e a densidade [64].

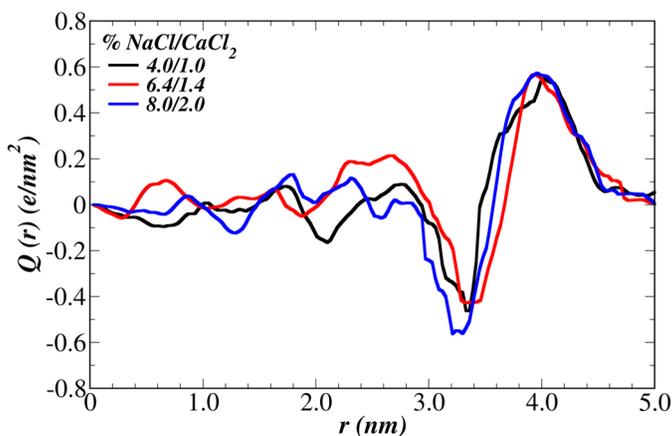


Figura 7: Carga líquida cumulativa, $Q(r)$ com diferentes concentrações de sal a 300K e 150 atm.

Na verdade, ao estimar a carga iônica líquida cumulativa $Q(r)$, a 300K e 150 atm, na interface da salmoura com a solução de óleo+CO₂ observada na Figura 7, tem-se a formação de uma dupla camada elétrica (*EDL*) na região entre 2,9 e 4,7 nm, com espessura de 1,8 nm, enquanto na superfície da salmoura, entre 3,6 e 4,7 nm, temos um excesso de carga positiva. Não houve mudanças significativas com o aumento da pressão. De acordo com a presença da *EDL* em sistemas óleo-salmoura, é visto na literatura que as emulsões o/a são estáveis, sugerindo que as fases óleo e H₂O são distintas e imiscíveis com uma camada iônica na interface [65].

Uma forma de caracterizar as emulsões é pelo tamanho das gotas. Como a emulsificação é um processo de agitação aleatória, a emulsão resultante é fornecida por um sistema polidisperso onde coexistem pequenas e grandes gotas. Ao observar nossas simulações, verificamos que a fase contendo H_2O ou salmoura adotou uma simetria cilíndrica, de modo que ao longo do eixo z observamos as circunferências de delimitação conforme Figura 6(c) e 6(d). A partir dessas circunferências, estimamos os diâmetros d ao longo de todo o eixo y e centrado na circunferência de cada sistema contendo H_2O ou salmoura. Consideramos 20 posições diferentes ao longo do eixo y e determinamos os valores de d de acordo com a Figura 8.

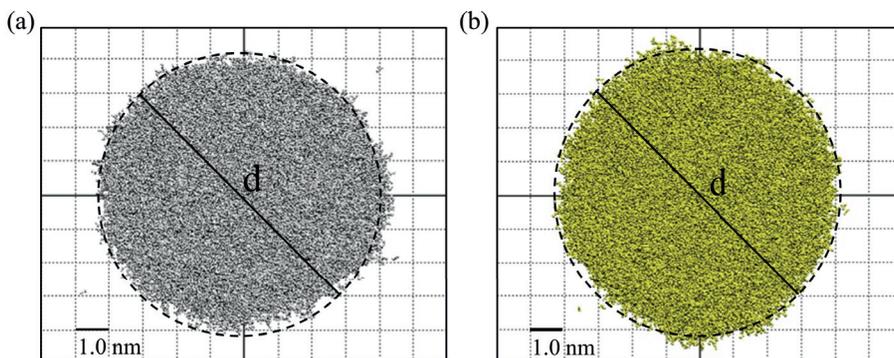


Figura 8: A determinação do diâmetro, d , para as gotas cilíndricas de (a) H_2O pura e (b) salmoura (8.0/2.0%) $\text{NaCl}/\text{CaCl}_2$.

Os resultados das variações para d foram extremamente pequenos. Enquanto que para H_2O puro, $d = 8,70 \pm 0,05$ nm, para a concentração de sal de (8,0/2,0%) $\text{NaCl}/\text{CaCl}_2$, $d = 8,80 \pm 0,02$ nm. Porém, a simetria cilíndrica para as concentrações de sal é mais estável quando comparada ao H_2O puro. Outro fator a favor da estabilidade seria em relação à quantidade de CO_2 difundido na fase H_2O ou salmoura. Em geral, o efeito da salinidade acaba protegendo a entrada de CO_2 na fase aquosa.

Para os casos em que o CO_2 está em interfaces ternárias com H_2O ou salmoura e óleo, os valores dos coeficientes de difusão de CO_2 na fase oleosa são semelhantes aos obtidos para sistemas sem H_2O ou salmoura, na ordem de $16,0 \times 10^{-9}$ m^2/s a 150 atm e $20,0 \times 10^{-9}$ m^2/s a 300 atm e não variando significativamente com a salinidade. Na verdade, todas as moléculas de CO_2 acabam entrando na fase de óleo formando uma mistura de CO_2 +óleo (ver Figura 6(e) e 6(f)) e apresentando uma diminuição na densidade do óleo e do CO_2 . Após a difusão do CO_2 no óleo, a densidade final do sistema CO_2 +óleo foi estimada em $(0,58 \pm 0,02)$ g/cm^3 e $(0,67 \pm 0,02)$ g/cm^3 a 150 atm e 300 atm respectivamente, considerando nas estatísticas os sistemas contendo H_2O puro e salmoura, observa-se uma redução de 30%

em média quando comparada à densidade do óleo puro.

4 | CONCLUSÕES

As propriedades termodinâmicas das interfaces fluido-óleo de EOR foram investigadas a partir de simulações de Dinâmica Molecular sob diferentes condições de pressão e concentração de sal. Nós estudamos as acumulações de moléculas aromáticas em sistemas salmoura+CO₂/óleo ternário (consulte as Figuras 2 (a) e 2 (b)) e em interfaces binárias salmoura/CO₂/óleo (Figura 2 (c)). Esse acúmulo foi observado tanto para a salmoura quanto para a interface de CO₂ e diminui com o aumento da salinidade e da pressão (Figura 3). A formação de uma interface em camadas rica em moléculas aromáticas pode ser um fator crucial na determinação do comportamento interfacial para tecnologias RMP.

Para a interface salmoura/óleo, em todos os casos estudados, foi observado um aumento da tensão interfacial com o aumento da pressão e da concentração de sal. Na solução aquosa, o efeito da hidratação das moléculas de água sobre os íons, percebe-se um aumento da imiscibilidade entre óleo e salmoura na interface, dentro da concentração de sal estudada.

Em relação as propriedades de transporte determinaram-se os perfis dos coeficientes de difusões na região de interface. Foi possível correlacionar os efeitos da tensão da interface e dos perfis de difusão na miscibilidade entre os componentes da interface. Para interfaces (H₂O ou salmoura)/óleo não foi observada difusão da molécula de H₂O dentro da fase oleosa. Porém, na região interfacial, observamos um discreto aumento da mobilidade com o aumento da pressão. Para o CO₂, esses valores são significativos quando consideramos as espessuras (menos de 3,0 nm) das camadas de H₂O ou salmoura separadas do óleo. Da mesma forma, com os menores valores de tensão interfacial, nossos resultados também sugerem uma completa miscibilidade entre os componentes acima de 150 atm para o CO₂. Para a interface ternária entre óleo, H₂O e CO₂, a difusão ocorre sem influência significativa por parte das moléculas de H₂O, de modo que a densidade final da mistura de CO₂+óleo é reduzida. Em termos de densidade do óleo puro, a redução foi de 30% em média.

A salinidade alterou ligeiramente a tensão interfacial CO₂/óleo na fase ternária, onde a salinidade não causa grandes mudanças na tensão interfacial, mas sob condições adequadas tais sais podem ajudar a estabilizar as emulsões, afetando algumas propriedades físicas locais do sistema, como a difusividade de moléculas e densidade.

Portanto, a mudança na molhabilidade do óleo quando em contato com H₂O, salmoura e CO₂, ocorre quando o CO₂ é injetado, modificando significativamente a recuperação do óleo. Como o CO₂ tende a se misturar com o óleo, ocorre um aumento de volume com conseqüente diminuição da densidade do óleo, alterando sua viscosidade e promovendo uma maior recuperação do óleo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CENAPAD-SP e a UEPG.

REFERÊNCIAS

1. Felipe Jiménez-Ángeles e Abbas Firoozabadi, J. Phys. Chem. C 2016, 120, 11910–11917.
2. Carmelo Herdes, Tim S. Totton, Erich A. Müller, Fluid Phase Equilibria 406 (2015) 91–100.
3. Erich A. Müller e Andrés Mejía, J. Phys. Chem. Lett. 2014, 5, 1267–1271.
4. Susan J. Altman et al, J. Phys. Chem. C 2014, 118, 15103–15113.
5. JB Buhna, PA Boppb, MJ Hampea, Journal of Molecular Liquids, 125 (2006) 187
6. P. Jungwirth, BJ Finlayson-Pitts, DJ Tobias, Chem. Rev., 106, (2006) 1137
7. D. Chandler, Nature, 437, (2005) 640
8. DK Hore, DS Walker, GL Richmond, J. Am. Chem. Soc., 130, (2008) 1800
9. D. Bonn, J. Eggers, J. Indekeu, J. Meunier, E. Rolley Rev. Mod. Phys., 81, (2009) 739
10. DM Mitrinovic, AM Tikhonov, M. Li, Z. Huang, ML Schlossman, Phys. Rev. Lett., 85, (2000) 582
11. Q. Du, E. Freysz, YR Shen, Science, 264, (1994) 826
12. LF Scatena, MG Brown, GL Richmond, Science, 292, (2001) 908
13. M. De Serio, H. Mohapatra, R. Zenobi, V. Deckert, Chem. Phys. Lett., 417, (2006) 452
14. T. Nomoto, H. Onishi, PCCP, 9, (2007) 5515
15. J. Lambert, R. Hergenröder, D. Suter, V. Deckert, Angew. Chem. Int. Ed., 48, (2009) 6343
16. TQ Vo e B. Lima, Sci. Rep. 6, (2016) 33881
17. KS Petersen, PL Christensen, CRC press, NY, (2007) 81
18. M. Burisch e UA Peuker, Chem. Eng. Technol., 39, (2016) 543
19. A. Navrotsky, Nature Materials, 2, (2003) 571
20. T. Biben, L. Joly, Phys. Rev. Lett., 100, (2008) 186103

21. JS Buckley, T. Fan, *Petrophysics*, 48, (2007) 175
22. JJ Trivedi, T. Babadagli, *Society of Petroleum Engineers*, (2008) SPE117607
23. M. Godec, V. Kuuskraa, V. van Leeuwen, LS Melzer, N. Wildgust, *Energy Procedia*, 4, (2011) 2162
24. MK Verma, *US Geological Survey*, 19 (2015), <https://dx.doi.org/10.3133/ofr20151071>
25. R. Farajzadeh, A. Andrianov, PLJ Zitha, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 49, (2010) 1910
26. LS Lara, MF Michelon, CR Miranda, *J. Phys. Chem. B*, 116, (2012) 14667
27. Z. Dai, R. Middleton, H. Viswanathan, J. Fessenden-Rahn, J. Bauman, R. Pawar, SY Lee, B. McPherson, *Environ. Sci. Technol. Lett.*, 1, (2014) 49
28. Z. Song, Z. Li, M. Wei, F. Lai, B. Bai, *Computers & Fluids*, 99, (2014) 93
29. ME Boot-Handford, JC Abanades, EJ Anthony, MJ Blunt, S.Brandani, N. Mac Dowell, JR Fernandez, MC. Ferrari, R. Gross, *Energy Environ. Sci.*, 7, (2014) 130
30. A. Ameri, NS Kaveh, ESJ Rudolph, KH Wolf, R. Farajzadeh, J. Bruining, *Energy Fuels.*, 27, (2013) 1015
31. T. Kuznetsova, B. Kvamme, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 4, (2002) 937
32. O. Lobanova, A. Mejía, G. Jackson, EA Müller, *Thermodynamics*, 93, (2016) 320
33. B. Liu, J. Shi, M. Wang, J. Zhang, B. Sun, Y. Shen, X. Sun, *J. of Supercritical Fluids*, 111, (2016) 171
34. J. Alejandro, GA Chapela, F. Bresme, JP. Hansen, *J. Chem. Phys.*, 130, (2009) 174505
35. C. Nieto-Draghi, T. de Bruin, J. Perez-Pellitero, JB Avalos, AD Mackie, *J. Chem. Phys.*, 126, (2007) 064509
36. BR Brooks, *J. Comp. Chem.*, 30, (2009) 1545
37. SS Jang, ST. Lin, PK Maiti, M. Blanco, WAJ Goddard, P. Shuler, Y. Tang, *J. Phys. Chem. B*, 108, (2004) 12130
38. E. Hockney, *Computer Simulation Using Particles*, Adam Hilger, NY, (1989)
39. AP Thompson, SJ Plimpton, W. Mattson, *J. Chem. Phys.*, 131, (2009) 154107
40. SJ Plimpton, *J Comp Phys*, 117, (1995) 1

41. LS Lara, T. Voltatoni, MC Rodrigues, CR Miranda, S. Brochsztain, Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects, 469 (2015) 42
42. M. Ueno, R. Mitsui, H. Iwahashi, N. Tsuchihashi, K. Ibuki, Journal of Physics: Conference Series, 215, (2010) 012074
43. KG Nayar, MH Sharqawy, LD Banchik, JH Lienhard V, Desalination, 390, (2016) 1
44. Z. Wang, B. Sun, L. Yan, Chem. Eng. Technol., 38, (2015) 75
45. M. Kunieda, K. Nakaoka, Y. Liang, CR Miranda, A. Ueda, S. Takahashi, H. Okabe, T. Matsuoka, J.Sou. Chem. Soc., 132, (2010) 18281
46. Sun C., Chen G., J. Chem. Eng. Data, 50, (2005) 936
47. DD Eley, trad. Faraday Soc., 35, (1939) 1281
48. R. Massoudi, AD King, J. Chem. Phys., 79, (1975) 1676
49. MY Chiang, KS Chan, DO Shah, Journal of Canadian Petroleum Technology, 17, (1978) 4
50. A. Fall, JD Rimstidt, R. bodnar, J. American Mineralogist, 94, (2009) 1569
51. LS Lara, MF Michelin, CO Metin, QP Nguyen, CR Miranda, J. Chem. Phys. 136, (2012) 164702
52. AK Tharanivasan, C. Yang, Y. Gu, Energy & Fuels, 20, (2006) 2509
53. DK Dysthe, AH Fuchs, B. Rousseau, International J. of Thermophysics, 19, (1998) 437
54. D. Zabala, C. Nieto-Draghi, JC Hemptinne, ALL Ramos, J. Phys. Chem. B, 112, 51, (2008) 16610
55. MR Riazi, CH Whitson, Ind. Eng. Chem. Res., 32, (1993) 3081
56. M. Jamialahmadi, M. Emadi, H. Müller-Steinhagen, Journal of Petroleum Science and Engineering, 53, (2006) 47
57. Z. Lingling, J. Jiayuan, T. Lu, L. Shangchao, Langmuir, 32, (2016) 9188
58. T. Al-Sahhaf, A. Elkamel, A. Suttar Ahmed, AR Khan, Chem. Eng. Comm., 192, (2005) 667
59. C. Miqueu, B. Mendiboure, C. Gracia, J. Lachaise, Fluid Phase Equilibria, 218, (2004) 189
60. M. Sahimi, BN Taylor, J. Chem. Phys, 95, (1991) 6749
61. D. Yang, Y. Gu, Petroleum Science and Technology, 23: 9-10, (2005) 1099

61. Z. Lun, H. Fan, H. Wang, M. Luo, W. Pan e R. Wang, *Energy & Fuels*, 26, (2012) 3958
62. D. Yang, Y. Gu e P. Tontiwachwuthikul, *Energy & Fuels*, 22, (2008) 2362
HN. Xu, Y. Liua e L. Zhang, *Soft Matter*, 11, (2015) 5926
63. MJ Rosen, *J. Colloid Interface Sci.*, 56 (1976) 320

REENTRY AND COLLISION RISK OF SPACE DEBRIS IN LEO REGION

Data de aceite: 01/03/2021

Data de submissão: 17/12/2020

Jarbas Cordeiro Sampaio

IFS – Inst Federal de Sergipe
Lagarto – Sergipe

<http://lattes.cnpq.br/0607563880296149>

Ewerton Felipe Barbosa Paim dos Santos

IFBA – Inst Federal da Bahia
Camaçari – Bahia

<http://lattes.cnpq.br/4223407797613999>

ABSTRACT: The increasing number of uncontrolled objects orbiting the Earth justifies efforts to observe and track them in order to avoid collisions among them and operational artificial satellites. These studies involve different disturbances and resonances in the orbital motion of these objects. Most of the cataloged space debris are found in low earth orbits (LEO). This work studies the orbital motion of space debris in the ISS's neighborhood. Real data from the 2-line element set provided by NORAD (North American Defense) are used to compare with the results obtained for orbital motions. The geopotential and atmospheric drag are used as perturbations in the SGP4 model. Figures show the time behavior of the orbital elements of the space debris in the process of reentry in the Earth and their distances to ISS showing that the collision risks of these objects with operational spacecraft is growing. Solutions for the space debris mitigation are necessary.

KEYWORDS: Space Debris, Reentry, Collision Risk.

RESUMO: O número crescente de objetos descontrolados orbitando a Terra justifica os esforços para observá-los e rastreá-los, a fim de evitar colisões entre eles e satélites artificiais operacionais. Estes estudos envolvem diferentes perturbações e ressonâncias no movimento orbital desses objetos. A maior parte dos detritos espaciais catalogados é encontrada em órbitas baixas da Terra (LEO). Este trabalho estuda o movimento orbital de detritos espaciais na vizinhança da ISS. Dados reais do grupo de elementos 2-linhas fornecidos pelo NORAD (North American Defense) são usados para comparar com os resultados obtidos para os movimentos orbitais. O geopotencial e o arrasto atmosférico são usados como perturbações no modelo SGP4. Figuras mostram o comportamento no tempo dos elementos orbitais dos detritos espaciais no processo de reentrada na Terra e as distâncias destes para a ISS mostrando que o risco de colisão destes objetos com espaçonave operacional está crescendo. Soluções para a diminuição de detritos espaciais são necessárias.

PALAVRAS - CHAVE: Detritos Espaciais, Reentrada, Risco de Colisão.

1 | INTRODUCTION

Since the launch of the first satellite, several space missions have been realized putting objects around the Earth. In this way, several studies are important to preserve the

operability and integrality of the operational artificial satellites, considering the increasing number of distinct objects in the space environment offering collision risks and, consequently, possible lost of mission (OSIANDER and OSTDIEK, 2009).

The International Space Station (ISS) is a great opportunity to use a research platform in space. An international partnership of space agencies of the United States (NASA), Russia (FKA), Japan (JAXA), Europe (ESA), Canada (CSA), among other, provides the operation of the ISS with astronauts since 2000 (ISS, 2015). The ISS is in Low Earth Orbits, in the same region of most of the space debris orbiting the planet. In this way, several studies are important to preserve the operability and integrality of the space station and operational artificial satellites, considering the increasing number of distinct objects in the space environment offering collision risks and, consequently, possible lost of mission (KLINKRAD, 2006; MECHISHNEK, 1995).

The constant monitoring of the ISS's orbit is needed, as well as the monitoring of the orbits of the more than three thousand Earth's satellites currently in operation is also required. The monitoring of temporal variation of the orbital elements of space debris in the LEO's region, as proposed in this paper by using of SGP4 model, can be useful of planning evasive maneuvers to avoid collisions and a premature reentry of spacecrafts (including the ISS). Another example of situation to be avoided is the collision between space debris and satellites that have reached the end of their useful life and are in a forced or planned reentry maneuvers for they do not become space debris too. In this case, collisions would generate more debris into LEO's region yet. Analyses of temporal variation of the orbital elements of space debris can also avoid these unwanted events.

The orbital dynamics of cataloged objects can be analyzed using the 2-line element group, or TLE of the NORAD (North American Defense). The TLE data are composed of seven parameters and epoch (HOOTS and ROEHRICH, 1980; SPACE TRACK, 2019).

Figure 1 shows that most of objects are in the region $13 < n \text{ (rev/day)} < 15$ by the histogram of the mean motion of artificial satellites and space debris in LEO region.

Synchronous satellites in circular or elliptical orbits have been extensively studied in the literature, due to the study of resonant orbits characterizing the dynamics of these objects (SAMPAIO et al., 2014; 2016).

In this work, a study is done about objects with orbital motions around the Earth in LEO region. These space debris reentry in the Planet in some moment. The TLE data of the cataloged objects are used and the orbit propagation is done considering the effects of the Geopotential and Atmospheric Drag. The orbital motions of space debris are studied in the neighborhood of the ISS - International Space Station. The results show that the collision risk of space debris with the ISS is high and solutions to avoid these events and for space debris mitigation are necessary.

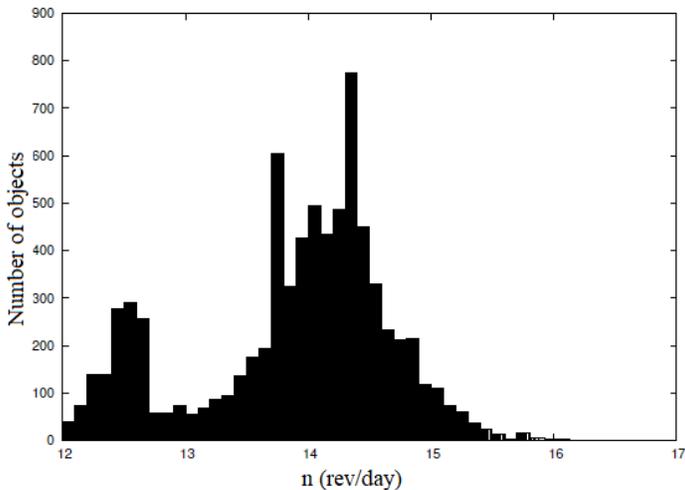


Figure 1: Histogram of the mean motion of the cataloged objects in LEO region.

In the next section, a propagation of the orbit is presented showing solutions for the time behavior of the orbital elements.

2 I PROPAGATION OF THE ORBIT

In this section, a method used to propagate the orbit is described. The initial data of the space debris are taken from the real orbital motions shown in the Two-Line Elements described before (see Figure 1). First, the real data are corrected and then propagated in time using the SGP4 model. More details about this method is shown in (HOOTS and ROEHRICH, 1980). The SGP model was used by the National Space Surveillance Control Center and after by the United States Space Surveillance Network with the goal to track the objects in orbital motions.

A previous study, described in Sampaio et al. 2014, shows a large research in resonant regions with several objects, including space debris. Results show that most of objects are in the region $13 < n < 16$, where n is the mean motion. The International Space Station is in the related region and studies about proximities with space debris, safety orbits and collision risks are natural consequences of the development of the work.

The propagation method shown in the present work considers effects of the geopotential and atmospheric drag, see Eqs. 2.7 to 2.19, while previous works, see Sampaio et al. 2014 and Sampaio et al. 2016, they consider only corrections in the TLE data and effects of the geopotential in the orbital dynamics of space debris shown by Eqs. 2.1 to 2.6.

The corrections in TLE data shown by Eqs. 2.1 to 2.6 are necessary because the Earth's atmosphere cause differences in the data produced by the sensors. Considering n_1 , the mean motion of the 2-line, the semi-major axis a_1 is calculated by Eq. (2.1),

$$a_1 = (\sqrt{\mu}/n_1)^{2/3}, \quad (2.1)$$

where μ is the Earth gravitational parameter, $\mu = 3.986009 \times 10^{14} \text{ m}^3/\text{s}^2$. Using a_1 , the parameter δ_1 is calculated by the Eq. (2.2),

$$\delta_1 = \frac{3}{4} J_2 \frac{a_e^2}{a_1^2} \frac{(3\cos^2(I)-1)}{(1-e^2)^{3/2}}, \quad (2.2)$$

where a_e is the Earth mean equatorial radius, $a_e = 6378.135 \text{ km}$, J_2 is the second zonal harmonic, $J_2 = 1,0826 \times 10^{-3}$, e is the eccentricity and I is the inclination of the orbital plane with the equator.

Now, the new semi-major axis a_o is defined using δ_1 from the Eq. (2.2) (HOOTS; ROECHRICH, 1980),

$$a_o = a_1 \left[1 - \frac{1}{3} \delta_1 - \delta_1^2 - \frac{134}{81} \delta_1^3 \right], \quad (2.3)$$

and a new mean motion n'_o and semi-major axis a'_o are found by the parameter δ_o ,

$$\delta_o = \frac{3}{4} J_2 \frac{a_e^2}{a_o^2} \frac{(3\cos^2(I)-1)}{(1-e^2)^{3/2}}, \quad (2.4)$$

$$n'_o = \frac{n_1}{1+\delta_o}, \quad (2.5)$$

$$a'_o = \frac{a_o}{1-\delta_o}. \quad (2.6)$$

The secular effects of gravitation and atmospheric drag are included in the next equations.

$$M' = M + \left[1 + \frac{3J_2 a_e^2 (-1+3\theta^2)}{4a_0'^2 \beta^3} + \frac{3J_2^2 a_e^4 (13-78\theta^2+137\theta^4)}{64a_0'^4 \beta^7} \right] n_0' (t - t_0), \quad (2.7)$$

$$\omega' = \omega + \left[-\frac{3J_2 a_e^2 (1-5\theta^2)}{4a_0'^2 \beta^4} + \frac{3J_2^2 a_e^4 (7-114\theta^2+395\theta^4)}{64a_0'^4 \beta^8} - \frac{15J_4 a_e^4 (3-36\theta^2+49\theta^4)}{32a_0'^4 \beta^8} \right] n_0' (t - t_0) \quad (2.8)$$

$$\Omega' = \Omega + \left[-\frac{3J_2 a_e^2 \theta}{2a_0'^2 \beta^4} + \frac{3J_2^2 a_e^4 (4\theta-19\theta^3)}{8a_0'^4 \beta^8} - \frac{15J_4 a_e^4 \theta (3-7\theta^2)}{16a_0'^4 \beta^8} \right] n_0' (t - t_0) \quad (2.9)$$

$$\delta\omega' = B^* C_3 (\cos(\omega)) (t - t_0) \quad (2.10)$$

$$\delta M' = -\frac{2}{3} (q_0 - \epsilon)^4 B^* q^4 \frac{a_e}{\epsilon \eta} \left[(1 + \eta \cos(M'))^3 - (1 + \eta \cos(M))^3 \right] \quad (2.11)$$

$$M'' = M' + \delta\omega' + \delta M' \quad (2.12)$$

$$\omega'' = \omega' - \delta\omega' - \delta M' \quad (2.13)$$

$$\Omega'' = \Omega' - \frac{21 n_0' J_2 a_e^2 \theta}{4 a_0'^2 \beta^2} C_1 (t - t_0)^2 \quad (2.14)$$

$$e'' = e - B^* C_4 (t - t_0) - B^* C_5 (\sin(M'') - \sin(M)) \quad (2.15)$$

$$a'' = a_0' [1 - C_1 (t - t_0) - D_2 (t - t_0)^2 - D_3 (t - t_0)^3 - D_4 (t - t_0)^4]^2 \quad (2.16)$$

$$\kappa'' = M'' + \omega'' + \Omega'' + n_0' \left[\frac{3}{2} C_1 (t - t_0)^2 + (D_2 + 2C_1^2) (t - t_0)^3 + \frac{1}{4} (3D_3 + 12C_1 D_2 + 10C_1^3) (t - t_0)^4 + \frac{1}{5} (3D_4 + 12C_1 D_3 + 6D_2^2 + 30C_1^2 D_2 + 15C_1^4) (t - t_0)^5 \right], \quad (2.17)$$

$$\beta'' = \sqrt{\{1 - e''^2\}}, \quad (2.18)$$

$$n'' = \sqrt{\frac{\mu}{a''^3}}, \quad (2.19)$$

where ω is the argument of pericentre, Ω is the longitude of the ascending node and M is the mean anomaly. $(t-t_0)$ is the time since epoch, B^* is the drag coefficient and J_4 the fourth gravitational zonal harmonic of the Earth.

Observe that Eqs. 2.7 to 2.19 show transformations, $(a, e, \omega, \Omega, M) \rightarrow (a'', e'', \omega'', \Omega'', M'')$, in the classical orbital elements and in other variables, as mean motion n . These transformations represent corrections in TLE data and effects of geopotential and atmospheric drag are included in orbital motions of space debris.

Some modifications are considered in the equations and used for objects in the process of reentering the Earth. For values for the perigee between 98 km and 156 km, the value of the constant is 1.01222928. So, it is possible to rewrite,

$$\epsilon * = a'_o(1 - e) - \epsilon + a_e \quad (2.20)$$

The value of ϵ is changed again, when the perigee is below 98 km,

$$\epsilon * = \frac{20}{X} + a_e \quad (2.21)$$

where $X = \text{Earth radii} / \text{kilometers} = 6378.135$.

Considering the changes in the constant, the term $(q_0 - \epsilon)^4$ is replaced by

$$(q_0 - \epsilon *)^4 = \left[[(q_0 - \epsilon)^4]^{1/4} + \epsilon - \epsilon * \right]^4 \quad (2.22)$$

where q_0 is a parameter for the SGP4 density function.

The terms used in Eqs. 2.7 to 2.17 $\theta, q, \beta, \eta, C_2, C_1, C_3, C_4, C_5, D_2, D_3$ and D_4 are described in Hoots and Roerich (1980), with the appropriate values of θ and $(q_0 - \epsilon)^4$.

In the next section, the orbital motion of the International Space Station, ISS, is studied.

3 | ORBITAL MOTION OF THE ISS

A theory to study orbital motion of objects in LEO region can be introduced considering perturbations caused, by the Geopotential and atmospheric drag. The orbital dynamics of the International Space Station is propagated using the equations presented in the second section.

Figures 2 to 5 show the time evolution of the classical keplerian elements of the ISS in 2018.

The orbital dynamics of the ISS is constantly monitored and corrections can be done to avoid the process of reentry in the Earth or collisions with space debris.

In Figure 2, it is possible to observe that in some time the ISS begins the process

of reentry needing corrections in your orbit. Several objects are in the same region of the ISS in Low Earth Orbits and orbital maneuvers are necessary to avoid collisions with space debris and the process of reentry in the Planet.

In the next section, the orbital motions of space debris in process of reentry are analyzed.

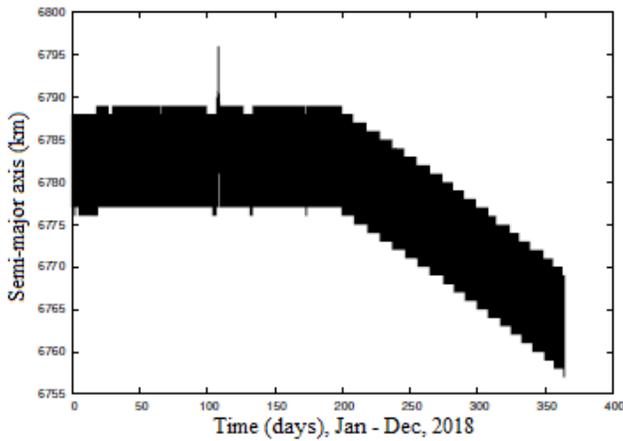


Figure 2: Orbital motion of the ISS corresponding to January/2018 to December/2018: Time behavior of the semi-major axis.

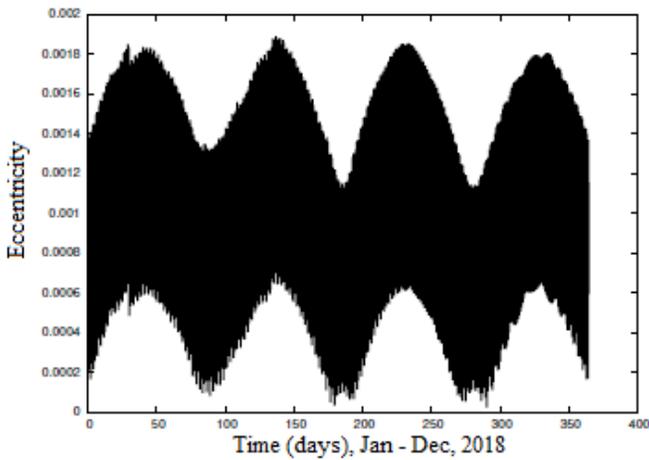


Figure 3: Orbital motion of the ISS corresponding to January/2018 to December/2018: Time behavior of the eccentricity.

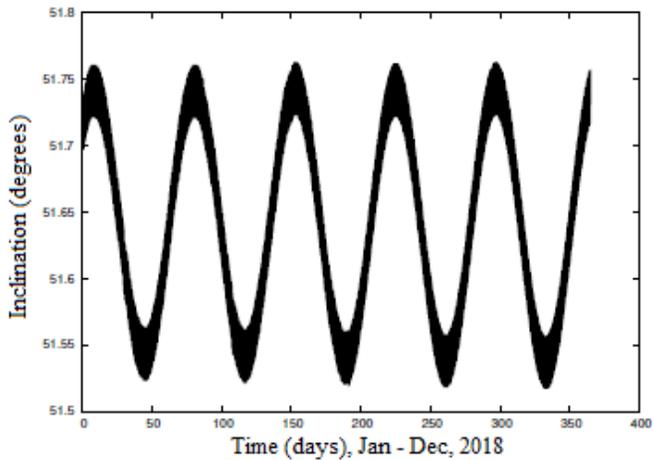


Figure 4: Orbital motion of the ISS corresponding to January/2018 to December/2018: Time behavior of the inclination.

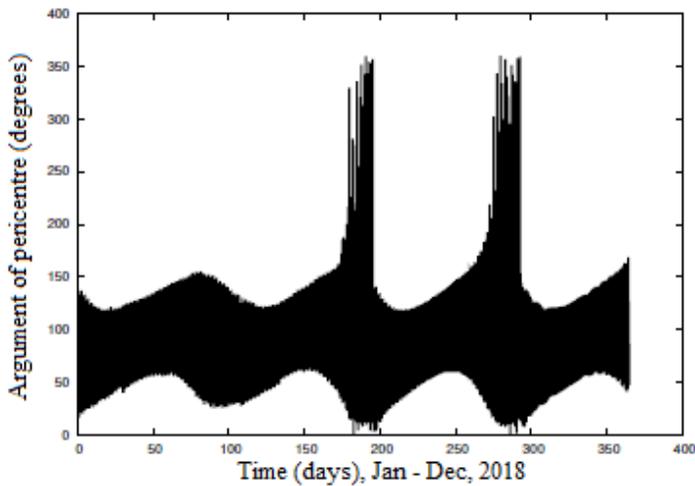


Figure 5: Orbital motion of the ISS corresponding to January/2018 to December/2018: Time behavior of the argument of pericentre.

4 | REENTRY IN THE EARTH

In this section, the orbital motions of space debris are analyzed. The objects, in the process of reentry, are faster when near the Earth's surface. The space debris FENGYUN 30158 has a prediction of reentry for May/2018.

Figures 6 a) and 6 b) show the time behavior of semimajor axis and the time behavior of eccentricity, respectively, of space debris Fengyun 30158. In some months, the process of reentry is completed, when the object reaching the Earth's surface, considering the

Earth's radius.

Figures 7 a) and 7 b) show the time behavior of semimajor axis and the time behavior of eccentricity, respectively, of space debris Techedsat 6 43026. In some months, the process of reentry is completed in May 22, 2018.

Table 1 shows some objects in process of reentry. The space debris analyzed can be fragments, tools, rocket bodies from space missions ISS, IRIDIUM 33 and DELTA 1. The predictions are for 2018 and 2019 and they can represent a safety planning and avoid risks to the population that collisions with the Earth can generate.

Name	Cataloged number	Reentry prediction
ISS deb	43206	November 16, 2018
IRIDIUM 33 deb	33964	May 29, 2018
DELTA 1 deb	00399	September 04, 2019

Table 1: Space debris in process of reentry.

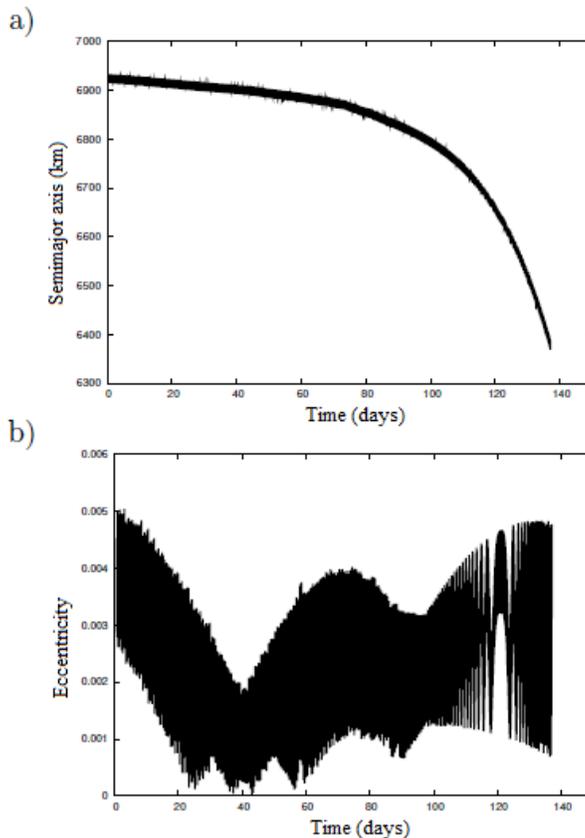


Figure 6: Orbital motion of space debris FENGYUN 30158 corresponding to January/01/2018 to May/18/2018: a) Time evolution of the semimajor axis and b) Time evolution of the eccentricity.

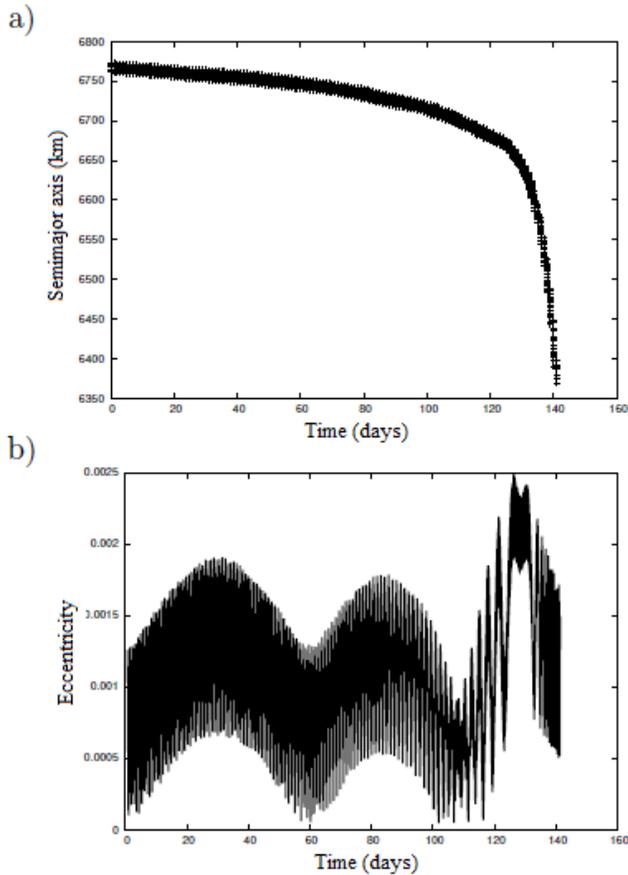


Figure 7: Orbital motion of space debris Techedsat 6 43026 corresponding to January/01/2018 to May/22/2018: a) Time evolution of the semimajor axis and b) Time evolution of the eccentricity.

In the next section, the orbital motions of some space debris are compared with the orbital dynamics of the ISS verifying possible collision risks.

5 I RANGE AND COLLISION RISK

In this section, the orbital motions of space debris and the International Space Station are compared, analyzing the moments of proximities between the orbits. These space debris are in the neighborhood of ISS and can offer collision risks. An impact in the ISS can damage the spaceship in several levels, depending on the size of the object that collided and the relative velocity between them.

The objects, in the process of reentry, are faster when near the Earth's surface. The space debris Sentinel 41803 has a prediction of reentry for September/2017, showing more situations of proximities with the ISS; while SL-18 28961 and Pegasus 24457 had

predictions to reenter in January/2018 and March/2018, respectively, what was confirmed after by real data. Figure 8 shows the orbital motions of space debris Sentinel 41803 and SL-18 28961 crossing the orbital motions of the ISS, by the time behavior of the semimajor axis.

Distances between the ISS and space debris Sentinel 41803 can be observed in Fig. 9, space debris SL-18 28961 in Fig. 10 and involving the ISS and Pegasus 24547, in Fig. 11. Both objects starts the orbital dynamics in the neighborhoods of ISS, but, after some time, the process of reentry is completed for objects Sentinel 41803 and Sentinel 41803. See Fig. 8 where can be observed, probably, the objects reaching the Earth's surface, considering the Earth's radius.

Analyzing the time behavior of the distances between space debris and operational artificial satellites is possible to know about collision risks and if is necessary some orbital maneuver.

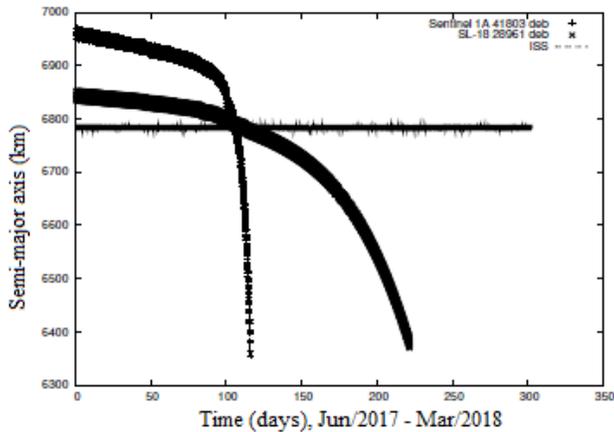


Figure 8: Time behavior of the semimajor axis of the ISS ($a_o=6782.44$ km) and space debris SL-18 28961 ($a_o=6836.26$ km) and Sentinel 41803 ($a_o=6960.46$ km).

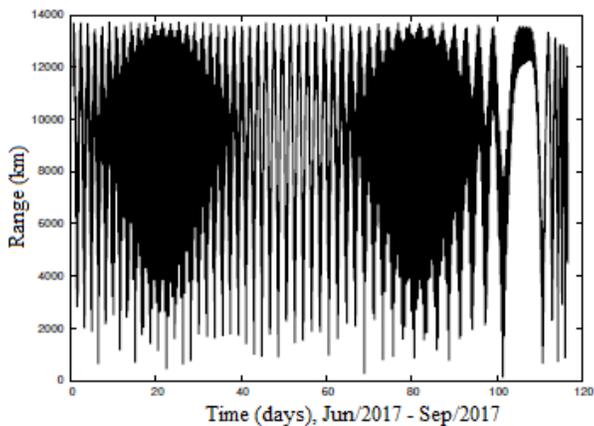


Figure 9: Time behavior of the distance between the orbital motions of the ISS and space debris Sentinel 41803.

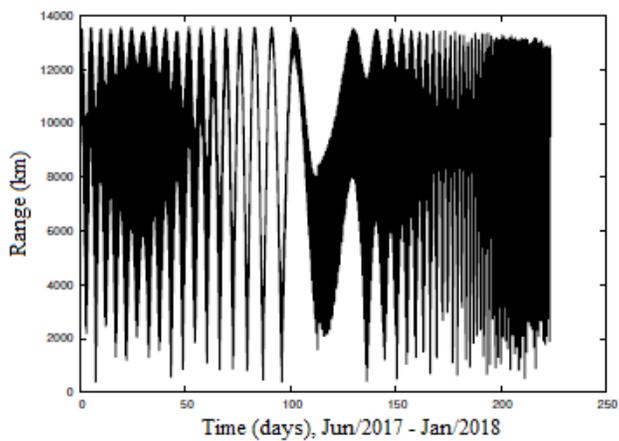


Figure 10: Time behavior of the distance between the orbital motions of the ISS and space debris SL-18 28961.

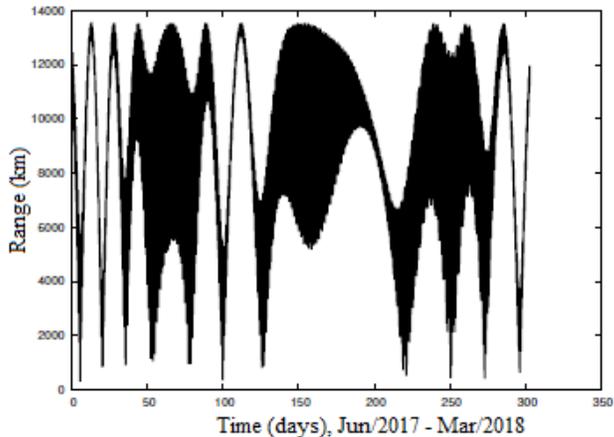


Figure 11: Time behavior of the distance between the orbital motions of the ISS and space debris Pegasus 24547.

6 | CONCLUSIONS

In this work, the orbital dynamics of space debris are studied. There are several operational artificial satellites in Low Earth Orbits, in the same region of most of the space debris orbiting the planet. So, several studies are important to preserve the operability of the space station, considering the increasing number of distinct objects in the space environment offering collision risks and, consequently, possible lost of mission.

The orbital motion of objects are propagated, considering perturbations of geopotential and atmospheric drag. Real data from the Two Line Elements Set of the NORAD are used as initial conditions to the time evolution of the orbital elements. The orbital dynamics of the ISS is compared with space debris and several moments of proximities are indicated.

The process of reentry of Fengyun 30158 and Techedsat 6 43026 in the Earth are observed when the time behavior of the semi-major axis of the space debris are studied.

Distances between the orbital motion of the ISS and the space debris can provide more security and informations about collision risks.

One can observe that the collision risk of space debris with the International Space Station is growing and solutions for the space debris mitigation are necessary.

As a future work, strategies to reduce space debris in LEO region can be studied.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was accomplished with support of the PROPEX / IFS, CNPQ - Brazil (contract 420674/2016-0) and FAPESB (Process 1430/2017).

REFERENCES

Hoots, F. R.; Roehrich, R. L. **Models for Propagation of NORAD Element Sets**, Spacetrack Report No. 3, 1980.

ISS - **International Space Station**. Available at: <www.nasa.gov/mission_pages/station>, accessed in October, 2017.

Klinkrad, H., **Space Debris: Models and Risk Analysis**. Springer-Praxis, Germany, 2006

Mechishnek, M. J., **Overview of the Space Debris Environment**, AEROSPACE REPORT NO. TR-95(5231)-3, 1995.

Osiander R.; Ostdiek, P. **Introduction to Space Debris**, Handbook of Space Engineering, Archeology and Heritage, 2009.

Sampaio, J. C.; Wnuk, E.; Vilhena de Moraes, R.; Fernandes, S. S. **Resonant Orbital Dynamics in LEO Region: Space Debris in Focus**, Mathematical Problems in Engineering, 2014.

Sampaio, J. C.; Vilhena de Moraes, R.; Fernandes, S. S. **Resonant Orbital Dynamics of CBERS Satellites**, In: Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics, v. 4, n. 1, 2016.

Space Track. **Archives of the 2-lines elements of NORAD**. Available at: www.space-track.org, accessed in Jun, 2019.

MODELAGEM CIENTÍFICA: CONSTRUÇÃO DE MODELO TEÓRICO DE DUAS MOLAS ASSOCIADAS EM SERIE E EM PARALELO SOB A ABORDAGEM ENERGÉTICA

Data de aceite: 01/03/2021

Data de submissão: 05/02/2021

Ricardo Robinson Campomanes Santana

Universidade Federal de Mato Grosso -
Instituto de Ciências Naturais, Humanas e
Sociais - ICNHS
Sinop – MT
<http://lattes.cnpq.br/4005610138735380>

Vitória Luiza Fernandes Frare

Universidade Federal de Mato Grosso -
Instituto de Ciências Naturais, Humanas e
Sociais - ICNHS
Sinop-MT
<http://lattes.cnpq.br/0240245623293118>

Jean Reinildes Pinheiro

Professor da Universidade Federal de Mato
Grosso - Instituto de Ciências Naturais,
Humanas e Sociais - ICNHS
Sinop – MT
<http://lattes.cnpq.br/4791706939726587>

RESUMO: No ensino básico e superior, os professores ao trabalhar as propriedades elásticas dos corpos, usam como exemplos o comportamento linear das molas. Esse comportamento é explicado através da denominada “Lei de Hooke”, consistindo que a força de deformação aplicada à mola é diretamente proporcional à elongação produzida na mola. No entanto, os modelos, apresentados em alguns livros didáticos, da associação em série e em paralelo de duas molas, predizem

a constante elástica equivalente como a soma das inversas das constantes elásticas, e a soma das constantes elásticas das molas individuais, respectivamente. Esses modelos carecem de adequada discussão sobre sua construção e não são testados empiricamente. No caso da associação em paralelo, a hipótese assumida no modelo tradicional é a igualdade das elongações de ambas as molas, o que não se ajusta com a realidade. No presente artigo, propomos uma expansão desse modelo tradicional para determinar a constante elástica equivalente de duas molas associadas em paralelo, na qual é modificada sua hipótese básica sob um enfoque energético. Para isto, seguiremos a abordagem da modelagem científica de Bunge, adotando um objeto-modelo e o incorporando na teoria da Mecânica Newtoniana. Logo, o modelo teórico proposto é validado empiricamente.

PALAVRAS - CHAVE: Associação de Molas. Energia Potencial Elástica. Lei de Hooke. Modelagem Científica.

SCIENTIFIC MODELING: CONSTRUCTION OF THE THEORETICAL MODEL OF TWO ASSOCIATED SPRINGS IN SERIAL AND PARALLEL UNDER THE ENERGY APPROACH

ABSTRACT: In basic and higher education, teachers, when working on the elastic properties of bodies, use the linear behavior of springs as examples. This behavior is explained through the so-called “Hooke's Law”, consisting that the deformation force applied to the spring is directly proportional to the elongation produced in the spring. However, the models, presented in

some textbooks, of the association in series and in parallel of two springs lack adequate discussion about their construction and are not tested empirically. In this article, we propose an expansion of the traditional model to determine the equivalent elastic constant of two associated springs in parallel, in which its basic hypothesis is modified under an energetic approach. For this, we will follow the approach of Bunge's scientific modeling, adopting a model object and incorporating it into Newtonian Mechanics theory. Therefore, the proposed theoretical model is validated empirically.

KEYWORDS: Springs Association. Potential Elastic Energy. Hooke's law. Scientific Modeling.

1 | INTRODUÇÃO

No reconhecido dicionário Aurélio (2004), existem diversas definições da palavra modelo, dentre as quais, as mais próximas na área das ciências exatas são: “conjunto de hipóteses sobre a estrutura ou o comportamento de um sistema físico pelo qual se procuram explicar ou prever, dentro de uma teoria científica, as propriedades do sistema” (Ibid., p. 1345), ou, “Representação simplificada e abstrata de fenômenos ou situação concreta, e que serve de referência para a observação, estudo ou análise” (Ibid., p. 1345). Para esclarecer, detalhar e ampliar esses conceitos de modelo nas ciências, seguiremos a abordagem da modelagem científica segundo o físico-matemático e filósofo da ciência Mario Bunge (MACHADO; BRAGA, 2019). Ele define (BUNGE, 1974, p. 16): “Um modelo teórico é um sistema hipotético-dedutivo que concerne a um objeto-modelo, que é, por sua vez, uma representação conceitual esquemática de uma coisa ou de uma situação real ou suposta como tal”.

Segundo Bunge (1974), existe uma variedade de escolhas de objetos-modelo m que resultam em modelos teóricos (também denominadas como teorias específicas T_s) diferentes de um mesmo sistema, sendo o modelo mais simples a caixa negra dotada somente de entrada e saída, que constituirá uma representação do funcionamento global do sistema em estudo. Ou uma caixa mais elaborada como a caixa cinzenta ou translúcida que além da entrada e saída é munida de mecanismo interno com estados internos.

Segundo essa escolha, Bunge explicita (1974, p. 21):

A escolha entre estes diversos objetos-modelo e os modelos teóricos correspondentes dependerá do objetivo do investigador. Se se trata apenas de manejar um sistema, então uma caixa negra poderá bastar; mas se se quer compreender o seu funcionamento, seja porque se quer dominá-lo ou modificá-lo então não se poderá deixar de imaginar modelos mais ou menos profundos, gozando de apoio de teorias gerais bem como do apoio de experiências novas (Ibid., p. 21).

Em relação às noções de objeto-modelo e modelo teórico na ciência fatural Bunge faz uns esclarecimentos (1974, p. 31):

Preocupar-nos-emos com objetos-modelo e modelos teóricos como esboços hipotéticos de coisas e fatos supostamente reais. Assim um fluido pode ser modelado como um contínuo dotado de certas propriedades e semelhante objeto-modelo pode ser enertado em uma das várias teorias gerais, digamos a mecânica clássica ou mecânica relativista geral. Do mesmo modo é possível modelar um organismo de aprendizagem como uma caixa negra equipada com determinados terminais de entrada e saída e pode-se desenvolver este objeto modelo em um sistema dedutivo hipotético. Em qualquer dos casos produz-se uma teoria específica ou modelo teórico de um objeto concreto. O que se pode submeter a provas empíricas são tais modelos teóricos: as teorias gerais despreocupadas com particulares permanecem incomprováveis, a menos que sejam enriquecidas com modelos de seus referentes. E os objetos-modelo mantêm-se estéreis a não ser que sejam introduzidos ou desenvolvidos em alguma teoria (Ibid., p. 31).

A seguir reproduzimos no quadro 1, dos autores Brandão et al. (2011), na qual ilustra com alguns exemplos da Física o processo de modelagem científica segundo Bunge (1974). Ressaltando que a primeira coluna denominada de situação a ser modelada é o que denominamos objeto - concreto a ser estudado.

Situação a ser modelada	Objeto-modelo	Teoria geral	Modelo teórico
Escoamento da água no interior de uma tubulação	Fluido contínuo sem viscosidade	Mecânica dos Fluidos	Modelo de fluido ideal
	Fluido contínuo com viscosidade		Modelo de fluido viscoso
Certa quantidade de gás contida num recipiente fechado	Sistema termicamente isolado de partículas que interagem via colisões perfeitamente elásticas com as paredes do recipiente.	Mecânica Estatística e Mecânica Clássica	Modelo de gás ideal clássico
		Mecânica Estatística e Mecânica Quântica	Modelo de gás ideal quântico
Comportamento da matéria em nível microscópico	Sistema de partículas sujeitas a uma força central.	Mecânica Clássica e Eletromagnetismo	Modelo atômico de Rutherford
Movimento dos planetas do Sistema Solar		Mecânica Clássica	Modelo gravitacional de Newton

Quadro 1: Exemplos de situações do processo da modelagem científica na Física

Observa-se, que um mesmo objeto-concreto, escoamento da água no interior de uma tubulação, pode ter mais de um objeto-modelo que ao ser inserido na teoria geral da Mecânica dos Fluidos resulta em dois modelos teóricos. Por sua vez, um objeto-concreto, como o gás contido num recipiente fechado, representado por um objeto-modelo, pode ser enertado em duas teorias gerais resultando em dois modelos teóricos.

Dentro deste contexto, elasticidade é uma propriedade que ocorre em alguns materiais quando são deformados por uma força de compressão, de tração ou flexão, e voltam ao seu estado inicial quando suprimida essa força deformadora. No ensino de Física,

em geral, é usado molas no estudo das propriedades elásticas a partir da Lei de Hooke, que relaciona a força restauradora da mola com a sua deformação, dada por (NUSSENZVEIG, 2013):

$$\vec{F} = -k\vec{x}, \quad (1)$$

sendo, k a constante elástica da mola e \vec{x} é a deformação ou a alongação da mola.

No geral, os livros de ensino de Física ao se referirem do termo “associações”, o usam em situações variadas como, resistores, capacitores e molas, seja em série ou em paralelo. Nos quais se constroem modelos simplificados, sem especificar detalhes, com o auxílio de analogias entre essas associações que algumas vezes resultam inadequadas, com hipóteses e aproximações pouco explícitas, e sem testes empíricos. Por exemplo, no modelo da associação em paralelo de duas molas, alguns livros didáticos apresentam que a constante elástica equivalente é dada como a soma das constantes elásticas das molas individuais (ATAM, 1998; PARANA, 1998; YOUNG; FREEDMAN, 2008). A predição desse modelo se ampara na hipótese de igualdade de alongações de ambas as molas, e é desprovido de testes empíricos. Em recente trabalho, Campomanes, Heidemann, e Veit (2016) mostraram que esse modelo tradicional é válido somente quando as constantes elásticas de ambas as molas são iguais. No entanto, a hipótese de igualdade de alongações malogra quando as molas individuais apresentam constantes elásticas diferentes. Logo, é necessária a expansão do modelo tradicional.

Neste trabalho, estudaremos a associação de duas molas associadas em série e em paralelo. Para as molas associadas em série faremos a contrastação empírica do modelo tradicional. Para o caso das molas associadas em paralelo, para constantes elásticas diferentes, é proposto um modelo teórico na qual como consequência de sua hipótese resulta uma constante elástica equivalente diferente do modelo tradicional. Para ambas as situações, seguiremos a abordagem da modelagem científica de Bunge (BUNGE, 1974; MACHADO; BRAGA, 2019), considerando um objeto-modelo que represente o objeto concreto (real), idealizando este através de simplificações e postulando uma hipótese sob enfoque energético e, em seguida, o objeto-modelo é inserindo à mecânica clássica como teoria geral. Posteriormente, este modelo teórico é testado empiricamente.

2 | CONSTRUÇÃO DO MODELO TEÓRICO DE DUAS MOLAS ASSOCIADAS EM SÉRIE

De acordo com Bunge (1974), o objeto-modelo é uma representação conceitual simplificada de seu referente, o objeto-concreto. No presente caso, o objeto-concreto é representado pela Figura 1, em que duas molas, de constantes elásticas k_1 e k_2 são colocadas em serie com uma carga pendurada no extremo livre da associação de molas.



Figura 1: Duas molas com constantes elásticas k_1 e k_2 associadas em série, com uma carga aplicada na extremidade livre da associação.

A Figura 2.b representa o objeto-modelo que considera algumas características do objeto-concreto representado na Figura 1, onde são feitas aproximações, simplificações e hipóteses. Considera-se que:

- i) As massas das molas, da haste, e as pequenas vibrações das molas são desprezíveis;
- ii) A associação de molas em série é representada por uma mola denominada equivalente de constante elástica k_E (ver Figura 2.c).
- iii) A elongação da mola equivalente “ x ” é dada pelo deslocamento entre a posição inicial do extremo livre da associação sem carga (posição $x=0$, linha horizontal tracejada da figura 2) e o ponto de suspensão da carga pendurada no extremo livre da associação quando as molas estão deformadas (seta central da Figura 2.b);
- iv) Os comportamentos das molas 1, 2 e equivalente obedecem a Lei de Hooke, ou seja, $F_1 = k_1 x_1$, $F_2 = k_2 x_2$ e $F = F_E = k_E x_E$. Sendo F , a força aplicada à associação de duas molas, a mesma à aplicada à mola equivalente.
- v) A soma da energia potencial elástica das molas 1 e 2 é igual a energia potencial elástica da mola equivalente (diferentemente da soma das elongações, $x_1 + x_2 = x_E$, dos livros didáticos).

Logo;

$$\frac{1}{2}k_1x_1^2 + \frac{1}{2}k_2x_2^2 = \frac{1}{2}k_E x_E^2 \quad (2)$$

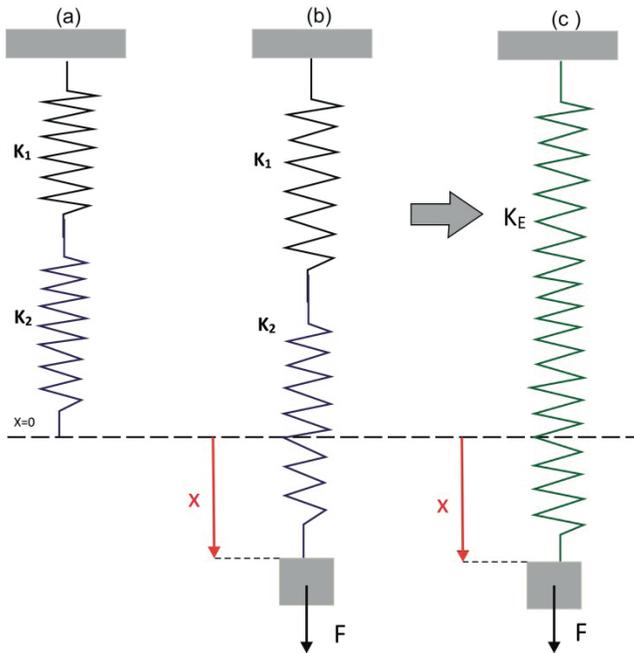


Figura 2: (a) Representação de duas molas associadas em série sem carga, (b) representação do objeto-modelo proposto a partir do objeto-concreto (Figura 1) com carga aplicada F no extremo livre da associação de molas, (c) mola equivalente que representa as duas molas com a mesma carga F e elongação à representada pela parte (b) desta Figura.

A equação (2) é a hipótese principal do presente modelo. Isolando as elongações da hipótese (iv), temos:

$$x_1 = \frac{F_1}{k_1}, \quad x_2 = \frac{F_2}{k_2} \quad e \quad x_E = \frac{F_E}{k_E} \quad (3)$$

Substituindo Eq.(3) na Eq.(2):

$$\frac{F_1^2}{k_1} + \frac{F_2^2}{k_2} = \frac{F_E^2}{k_E} \quad (3.a)$$

Por outro lado, a força deformadora $F = F_E$ é a mesma força que age na mola 1 e na mola 2, ou seja: $F_1 = F_2 = F_E = F$ e o substituindo na Eq. (3.a), temos:

$$\frac{1}{k_E} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} \quad (4)$$

A Eq.(4) é a predição do valor da constante elástica equivalente do modelo teórico.

2.1 Contratação do Modelo Teórico

Foram coletados os dados de Força e alongação para a carga pendurada de acordo à configuração experimental representada na Figura 1, como também das molas de maneira separada, a incerteza na medida da alongação equivalente, considerando o efeito de paralaxe, foi de 0,002 metros. Posteriormente os dados são plotados como mostra a Figura 3.

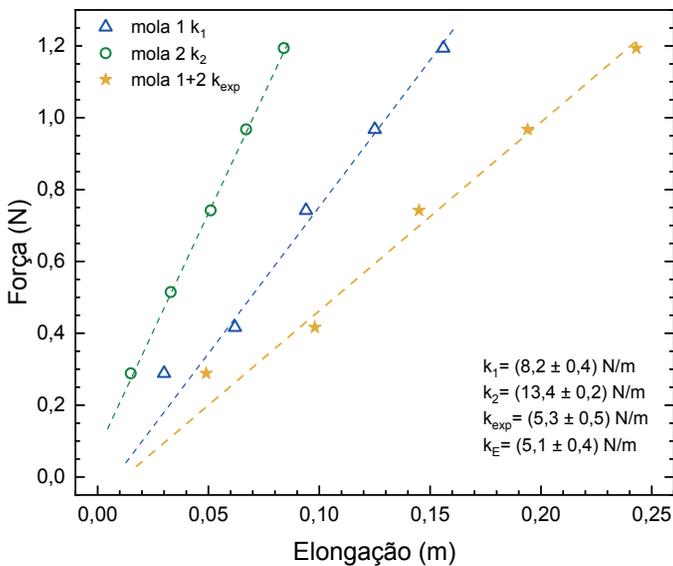


Figura 3: Força aplicada em função da alongação para as molas 1, 2 e equivalente. Nesta última, as molas 1 e 2 são associadas em série.

Nessa figura observa-se as curvas de ajuste linear para a determinação da constante elástica da mola 1, mola 2 e das molas associadas em série. Sendo esses valores de $k_1 = (8,2 \pm 0,4) \text{ N/m}$, $k_2 = (13,4 \pm 0,2) \text{ N/m}$ e $k_{exp} = (5,3 \pm 0,5) \text{ N/m}$, respectivamente.

Enquanto que, o valor predito pela Eq. (4), deduzida dentro do modelo teórico, é $k_E = (5,1 \pm 0,4) \text{ N/m}$. Portanto, considerando a incerteza da predição, podemos inferir que o resultado experimental corrobora empiricamente o modelo teórico.

3 I CONSTRUÇÃO DO MODELO TEÓRICO DE DUAS MOLAS ASSOCIADAS EM PARALELO

No presente caso, o objeto-concreto é representado pela Figura 4 (Figuras 4.b e 4.c), em que duas molas de constantes elásticas diferentes ($k_1 \neq k_2$), inicialmente de mesmo comprimento como mostra a Figura 4.a, são associadas em paralelo com uma haste as unindo nas suas extremidades inferiores com uma carga pendurado num ponto da haste.

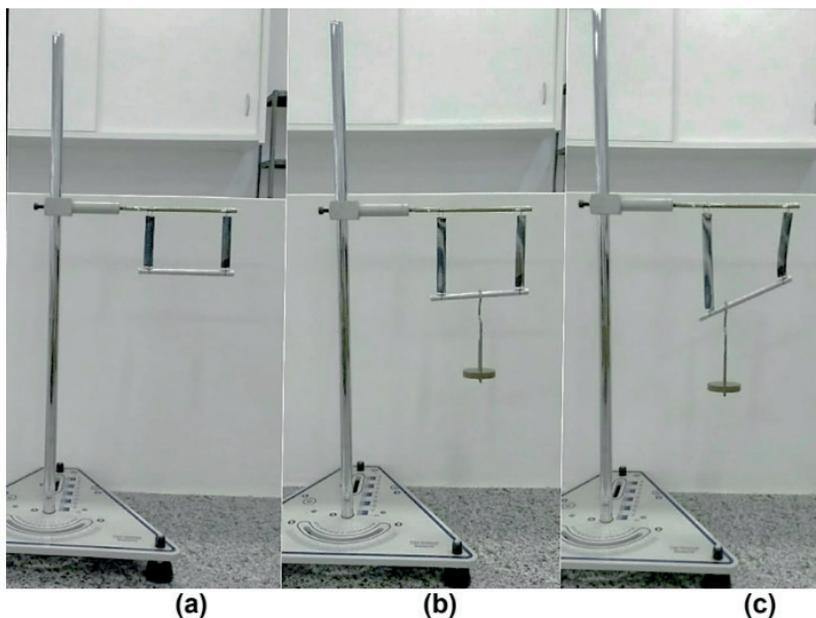


Figura 4: (a) Duas molas com constantes elásticas diferentes ($k_1 \neq k_2$), de igual comprimento associadas em paralelo com uma haste de alumínio unindo suas extremidades; (b) com uma carga aplicada no centro da haste; e (c) a carga aplicada próxima da mola 1.

A Figura 5.a representa o objeto-modelo que considera algumas características do objeto-concreto representado na Figura 4.c, onde são feitas aproximações e hipóteses:

- i) As massas das molas, da haste, e as pequenas vibrações das molas são desprezíveis.
- ii) As molas 1 e 2 estão na posição vertical e ambas são paralelas.
- iii) A associação de duas molas é representada por uma mola denominada equivalente de constante elástica k_E (ver Figura 5.b).
- iv) a carga aplicada na haste não é necessariamente aplicada no centro deste (ver Figura 5.a), sendo L_1 a distância entre o extremo inferior da mola 1 e o ponto de aplicação da carga ($L = L_1 + L_2$, sendo L o comprimento da haste).

v) A elongação da mola equivalente \vec{x}_E é dada pelo deslocamento entre a posição inicial da haste sem carga (posição $x=0$, linha horizontal tracejada cor vermelha) e o ponto de suspensão da carga pendurada na haste quando as molas estão deformadas (seta central da Figura 5.a).

vi) Os comportamentos das molas 1, 2 e equivalente obedecem a Lei de Hooke, ou seja, $F_1 = k_1 x_1$, $F_2 = k_2 x_2$ e $F = F_E = k_E x_E$. Sendo F, a força aplicada à associação de duas molas, considerada a mesma aplicada à mola equivalente.

vii) Assume-se que a soma da energia potencial elástica das molas 1 e 2 é igual a energia potencial elástica da mola equivalente (diferentemente da hipótese de igualdade de elongações, dos livros didáticos).

Logo:

$$\frac{1}{2} k_1 x_1^2 + \frac{1}{2} k_2 x_2^2 = \frac{1}{2} k_E x_E^2 \quad (5)$$

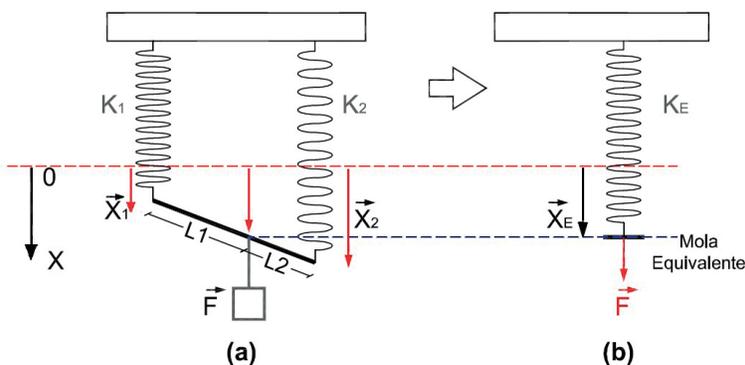


Figura 5: (a) Representação do objeto-modelo proposto a partir do objeto-concreto (Figura 4.c) de duas molas associadas em paralelo com elongações diferentes $x_1 \neq x_2$, com carga aplicada F em qualquer ponto da haste, (b) mola equivalente que representa às duas molas da parte (a) com a mesma carga F e elongação x_E .

Ao igual da associação de molas em série, a equação (5) é a hipótese do presente modelo proposto. Logo, enxertamos o objeto-modelo numa teoria geral, neste caso a mecânica Newtoniana.

Fazendo o Diagrama de Corpo Livre (DCL) da haste (ver Figura 6).

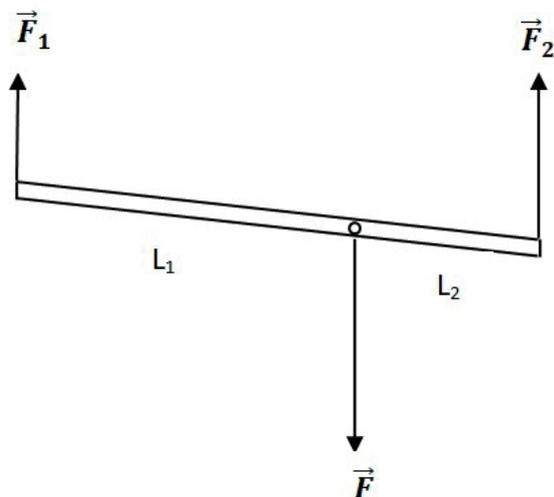


Figura 6: DCL da haste do objeto-modelo, onde são mostradas as forças que agem na haste.

Aplicando a Primeira Condição de Equilíbrio (Equilíbrio de Translação) e Segunda Condição de Equilíbrio (Equilíbrio de Rotação em torno do ponto O da haste), temos:

$$F_1 + F_2 = F \quad (6.a) \quad (1^a \text{ Cond. de Equilíbrio})$$

$$F_1 L_1 = F_2 L_2 \quad (6.b) \quad (2^a \text{ Cond. de Equilíbrio})$$

Sendo, $L = (L_1 + L_2)$ o comprimento da haste, isolando $L_2 = L - L_1$, substituindo na Eq. (6.b):

$$F_1 L_1 = F_2 (L - L_1) \rightarrow (F_1 + F_2) L_1 = F_2 L \quad (6.c)$$

Logo, Eq. (6.a) em Eq. (6.c):

$$F L_1 = F_2 (L - L_1) \rightarrow F_2 = \left(\frac{L_1}{L}\right) F \quad (6.d)$$

Analogamente,

$$F_1 = \left(\frac{L_2}{L}\right) F \quad (6.e)$$

Por outro lado; usando a hipótese (vi) nas equações (6.d) e (6.e), temos:

$$x_1 = \frac{L_2}{L} \frac{F}{k_1}, \quad x_2 = \frac{L_1}{L} \frac{F}{k_2}, \quad x_E = \frac{F}{k_E} \quad (6.f)$$

Substituindo Eq. (6.f) na Eq. (5),

$$\left(\frac{L_2}{L}\right)^2 \frac{1}{k_1} + \left(\frac{L_1}{L}\right)^2 \frac{1}{k_2} = k_E \left(\frac{1}{k_E}\right)^2 = \frac{1}{k_E} \quad (6.g)$$

Reordenando,

$$k_E = \frac{1}{\left(\frac{L_2}{L}\right)^2 \frac{1}{k_1} + \left(\frac{L_1}{L}\right)^2 \frac{1}{k_2}} \quad (7)$$

3.2 Contratação do Modelo Teórico

Para validar o modelo teórico proposto, contrastaremos os valores de k_E que prediz o modelo segundo a equação (7) com as evidências experimentais. Para isto, primeiramente, são determinadas as constantes elásticas individuais das molas 1 e 2, usando os dados coletados de massa da carga (arruelas inseridas num gancho) e da elongação das molas medidas com uma balança e uma régua milimétrica, respectivamente. A incerteza da medida da massa e da elongação foi de 0,01g e 0,002m, nessa ordem. Posteriormente, usando o *software origin* são plotados os dados da Força F (Peso das “arruelas + gancho” = mg) – *versus* - elongação e via ajuste linear é obtido a constante elástica de cada mola através do coeficiente angular, obtendo-se: $k_1 = (7,2 \pm 0,2)$ N/m e $k_2 = (12,8 \pm 0,2)$ N/m.

Posteriormente, as molas 1 e 2 foram suspensas em um suporte horizontal e conectadas em seu extremo inferior por uma fina haste de comprimento L (8cm). Em seguida, foram coletados dados em duas situações: (1) quando a carga é pendurada no centro da haste; e (2) quando a carga é pendurada na haste próxima da mola 1 ($L_1 = 3L/8$). No que segue, apresentamos os resultados obtidos.

3.2.1 Contraste do modelo teórico para o ponto central da haste $L_1=L/2$

Foram coletados os dados para a carga pendurada no centro da haste, configuração experimental representada na Figura 4.b, na qual a haste não permanece horizontal, sendo a elongação da mola 1 maior da elongação da mola 2. Em consequência, as forças restauradoras das molas F_1 e F_2 são diferentes. Os dados experimentais de Força e elongação equivalente foram plotados (ver Figura 7), da curva de ajuste linear se determina $k_{exp} = (18,7 \pm 0,4)$ N/m ao passo que o valor predito pela Eq.(7), deduzida dentro do modelo teórico, é $k_E = (18,4 \pm 0,4)$ N/m.

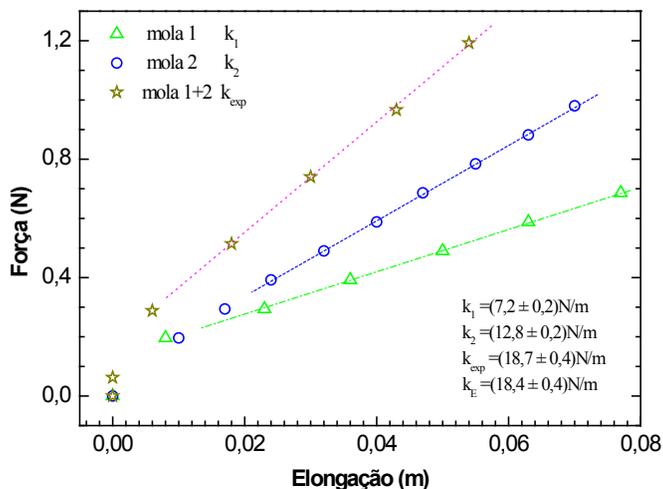


Figura 7: Força em função da elongação para as molas 1, 2 e a mola equivalente. Nesta última, as molas 1e 2 são associadas em paralelo, com a carga pendurada no centro da haste. A predição do modelo para a constante elástica equivalente está denotado por k_E .

Considerando a incerteza do prognóstico do modelo, constata-se que a predição e o valor estimado experimentalmente se justapõem, o que pode ser considerado como uma evidência da validade do modelo teórico para representar o evento investigado.

3.2.2 Contraste do Modelo Teórico Para o Ponto da Haste $L_1=3L/8$

Em forma similar que na anterior sub Seção, foram coletados os dados para a carga, esta vez pendurada no ponto da haste $L_1 = 3L/8$ (3cm), configuração experimental similar à representada na Figura 4.c. Os resultados são mostrados na Figura 8, onde a constante elástica das duas molas associadas em paralelo determinada pelo de ajuste linear da curva é $k_{exp} = (15,6 \pm 0,4)$ N/m. Nessa configuração o modelo prediz pela Eq.(6), o valor de $k_E = (15,3 \pm 0,4)$ N/m. Portanto, podemos inferir que o resultado experimental corrobora empiricamente o modelo teórico contrastado.

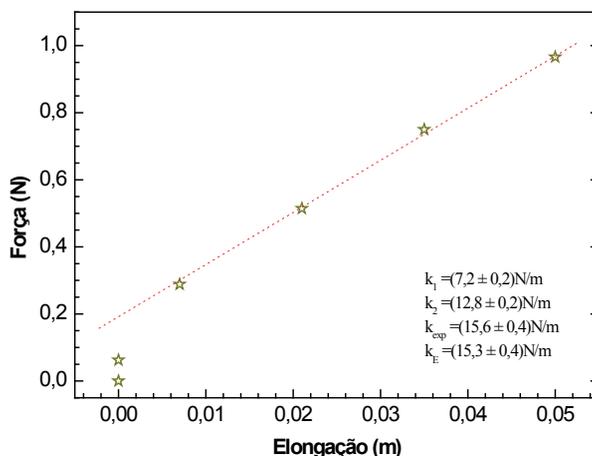


Figura 8: Força em função da elongação da mola equivalente, com a carga aplicada em $L_1=3L/8$. A predição do modelo para a constante elástica equivalente está denotado por k_E .

4 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados encontrados no presente trabalho são de interesse na discussão da construção de modelos científicos, e pela sua simplicidade conceitual e baixo custo experimental pode ser desenvolvido, dependendo do enfoque, com alunos do Ensino Médio e alunos do Ensino Superior da área de exatas. Um guia de referência para a aplicação da modelagem científica em atividades de ensino de Física é exposto com detalhe por Heidemann, Araujo e Veit (2016).

A boa escolha do objeto-modelo, as hipóteses e simplificações deste resultará preponderante na obtenção do modelo teórico, além de uma dose de intuição, domínio conceitual e uso da matemática. A contrastação empírica do modelo teórico tanto da associação de molas em série, quanto, a associação de molas em paralelo foi satisfatória, sendo que a hipótese dada pelas equações (2) e (5) são validadas indiretamente através das equações (4) e (7), respectivamente. A hipótese (2) e (5) pode ser avaliada conceitualmente da forma seguinte:

No sistema representado pela Figura 5.a, a energia mecânica se conserva. Logo:

$$\frac{1}{2}k_1x_1^2 + \frac{1}{2}k_2x_2^2 = W_g \quad (7.a)$$

Onde os dois termos da esquerda da igualdade da Eq. (7.a) são a energia potencial elástica das molas 1 e 2, que se opõem à deformação. Por sua vez, o termo à direita, é o trabalho realizado pelo campo gravitacional (W_g) através da carga pendurada de

intensidade F para a associação de molas se deslocar x_E . Como definido acima $F = F_E$ é a força variável aplicada à mola equivalente. Logo o trabalho W_g é dado por:

$$W_g = \int_0^{x_E} F_E dx'_E = \int_0^{x_E} k_E x'_E dx'_E = \frac{1}{2} k_E x_E^2 \quad (7.b)$$

Ou seja, conceitualmente é demonstrado que a soma da energia potencial elástica das molas 1 e 2 é igual à energia potencial elástica da mola equivalente. Essa hipótese de conservação da energia elástica está embutida na equação (7) que é a predição do modelo teórico, o qual foi validado com as evidências experimentais. Destacando, que o teste foi feito no modelo teórico e não na Teoria Geral usada “Mecânica Newtoniana” que se mantém imune.

REFERÊNCIAS

ATAM, P. A. **Introduction to Classical Mechanics**, 2a ed., Upper Sadle River: Prentice Hall, 1998.

AURÉLIO. **Novo dicionário Aurélio da Língua Portuguesa**, Editora Positivo, Curitiba, 2004.

BRANDÃO, R. V.; ARAUJO, I. S.; VEIT, E. A. **A Modelagem Científica vista como um Campo Conceitual**. Caderno Brasileiro de Ensino de Física. Florianópolis, v. 28, n. 3: p. 507-545, dez. 2011.

BUNGE, M. **Teoria e Realidade**. São Paulo: Editora Perspectiva, 1974.

CAMPOMANES, R. R.; HEIDEMANN, L. A.; VEIT, E. A. **Modelo de associação de molas em paralelo em atividades de ensino de Física: uma análise do domínio de validade**. Revista Brasileira de Ensino de Física. São Paulo, v. 42, e20190076, Jan. 2020.

HEIDEMANN, L. A.; ARAUJO, I. S.; VEIT, E. A. **Modelagem Didático-científica: integrando atividades experimentais e o processo de modelagem científica no ensino de Física**. Caderno Brasileiro de Ensino de Física. Florianópolis, v. 33, n. 3, p. 3-32, Abr. 2016.

MACHADO, J.; BRAGA, M. **O centenário de Mario Bunge: contextualizando sua obra sobre modelos científicos na filosofia da ciência e como referencial na pesquisa em ensino**. Caderno Brasileiro de Ensino de Física. Florianópolis, v. 36, n. 1, p. 178-203, Abr. 2019.

NUSSENZVEIG, M. **Curso de Física Básica: Mecânica**. 5ª ed., vol. 1, Editora Blucher, 2013.

PARANÁ, D. N. S. **Física para o Ensino Médio**. v.2, São Paulo: Editora Ática, 1998.

YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A. **Física I: Mecânica**, 12ª ed., Pearson Education, 2008.

CAPÍTULO 6

UMA PROPOSTA EXPERIMENTAL NO ESTUDO DO ELETROMAGNETISMO: TREM MAGNÉTICO SIMPLES

Data de aceite: 01/03/2021

José Tiago de Sousa

Instituto Federal do Piauí. Picos-PI.

Isaiane Rocha Bezerra

Instituto Federal do Piauí. Picos-PI.

Bento Bruno de Sousa

Instituto Federal do Piauí. Picos-PI.

Gilson Mauriz Gomes

Instituto Federal do Piauí. Picos-PI.

RESUMO: Os primeiros ímãs que a humanidade conheceu foi na antiguidade. Fenômenos magnéticos são todas as interações observadas entre ímãs, desta forma, o termo magnetismo passou a ser empregado para estudar os fenômenos e as propriedades que envolvem os ímãs. Um solenoide, quando percorrido por uma corrente elétrica, cria um campo magnético no seu interior e exterior, o experimento montado para a construção deste trabalho foi chamado de Trem Magnético, onde a ideia principal foi demonstrar o efeito magnético de um ímã em um solenoide, sendo que a montagem é feita com materiais de relativo acesso. O experimento foi construído e apresentado por alunos da disciplina de Laboratório de Eletromagnetismo do curso de Licenciatura em Física.

PALAVRAS - CHAVE: Experimento, Eletromagnetismo, Campos Magnéticos.

ABSTRACT: The first magnets that humanity knew was in antiquity. Magnetic phenomena are all the interactions observed between magnets, so the term magnetism has come to be used to study the phenomena and properties that surround magnets. A solenoid, when traversed by an electric current, creates a magnetic field inside and outside, the experiment set up for the construction of this work was called Magnetic Train, where the main idea was to demonstrate the magnetic effect of a magnet on a solenoid, the assembly is made with materials of relative access. The experiment was built and presented by students of the Electromagnetism Laboratory discipline of the Physics Degree course.

KEYWORDS: Experiment, Electromagnetism, Magnetic Fields.

1 | INTRODUÇÃO

Os primeiros ímãs que a humanidade conheceu foi na antiguidade, na Ásia menor, na região da Magnésia, onde foram encontradas grandes quantidades de um minério de ferro, denominado *magnetita*, em homenagem a região que foi encontrado. A *magnetita* era um material que possuía a propriedade de atrair objetos de metal, muito mais tarde os chineses usaram as propriedades desse material para construir as primeiras bússolas, que possuíam a finalidade de orientação nas viagens marítimas (MACHADO, 2013).

Durante vários séculos, diversos experimentos foram feitos para se obter uma

explicação do fenômeno que consistia no alinhamento da agulha de uma bússola ao colocá-la próxima de um ímã. Em um experimento realizado por Hans Christian Orsted, em 1820, foi verificado que quando uma corrente elétrica passa por um fio que está paralelo a agulha de uma bússola próxima a este fio, a agulha sofre um desvio na direção perpendicular ao norte-sul. Sendo assim, deduz-se que a corrente elétrica gera um campo magnético que interage com o campo magnético da bússola, essa ideia foi relacionada na Lei de Biot-Savart (MACHADO, 2013).

Na Física, denominam-se fenômenos magnéticos todas as interações observadas entre ímãs, desta forma, o termo magnetismo é empregado para estudar os fenômenos e as propriedades que envolvem os ímãs. Descreve-se abaixo algumas propriedades desses materiais:

I – Nas primeiras observações realizadas a respeito dos ímãs, foi possível observar que eles tinham a capacidade de interagir entre si e também atraíam outros metais. Através de experimentos, percebeu-se que esses materiais produziam um campo ao seu redor, denominado campo magnético, onde as extremidades desse campo foram chamadas de polos do ímã, ou polos magnéticos, designados de polo norte e polo sul.

II – Colocando um ímã suspenso, percebeu-se que ele sempre se posiciona em direção ao norte-sul geográfico. Convencionou-se que polo norte do ímã aponta para o polo sul geográfico, e o polo sul do ímã aponta para o norte geográfico.

III – Os ímãs exercem entre si forças de ação mútua de atração e repulsão, conforme a posição em que são postos um em frente ao outro. Polos iguais se repelem e polos diferentes se atraem (SILVA, 2019).

Uma bobina helicoidal, composta por um fio condutor, formada por espiras circulares muito próximas, recebe o nome de solenoide. Um solenoide, quando percorrido por uma corrente elétrica, cria um campo magnético no seu interior e exterior, apresentando uma configuração de campo magnético semelhante ao de um ímã em barra, então, diz-se que ele constitui um eletroímã, ou seja, um ímã obtido por meio de corrente elétrica (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2013).

O campo magnético do solenoide é a soma vetorial dos campos produzidos pelas espiras. No caso de pontos muito próximos de uma espira, o fio se comporta magneticamente como um fio retilíneo, e as linhas do campo são praticamente círculos concêntricos. As linhas de campo apresentam pequenos espaçamentos no interior do solenoide, o que indica que o campo magnético nessa região é mais intenso. Do lado de fora do solenoide, as linhas de campo são mais espaçadas indicando que o campo é menos intenso (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2013).

A orientação do campo magnético no interior do solenoide é dada pela regra da mão direita, segurando o solenoide com a mão direita, os dedos são apontados no sentido da corrente, o polegar estendido mostra a orientação do campo magnético (HALLIDAY;

RESNICK; WALKER, 2013).

O experimento montado foi chamado de Trem Magnético simples, onde a ideia principal do experimento foi demonstrar o princípio de funcionamento dos trens magnéticos reais que são utilizados nas grandes cidades. Em que são utilizados grandes eletroímãs para fazer o trem flutuar, deslocar-se e fazer curvas através da força magnética, fazendo com que haja diminuição de atrito e um alto desempenho em sua velocidade. Foi idealizado e patenteado por Alfred Zehden em 1902 (MONTEIRO, 2018).

Para a construção deste trabalho, foi realizada uma pesquisa sobre experimentos que envolviam fenômenos eletromagnéticos, os quais fossem montados com materiais de relativo acesso. O experimento foi construído e apresentado por alunos da disciplina de Laboratório de Eletromagnetismo do curso de Licenciatura em Física.

2 | METODOLOGIA

O experimento realizado para a construção deste trabalho foi baseado em experimentos semelhantes encontrados no *YouTube*. O experimento nomeado de “Trem magnético simples” é uma demonstração dos efeitos magnéticos de um ímã em um solenoide, sendo que a montagem é feita com materiais de relativo acesso e de fácil confecção. O referencial básico para a elaboração do aparato experimental foi um vídeo específico do canal Manual do Mundo, o link para o acesso do mesmo está disponível nas referências.

Para a compreensão do funcionamento e dos conceitos fundamentais do fenômeno físico gerado pelo experimento, foram feitas pesquisas em livros, artigos, sites e revistas, e também, pelas orientações do professor ministrante da disciplina, este projeto foi desenvolvido na disciplina de Laboratório de Eletromagnetismo, do curso de Licenciatura em Física do Instituto Federal do Piauí (IFPI) – Campus Picos. Ressalta-se que parte da montagem foi realizada no laboratório de Física da referida instituição.

No Quadro 1 são ilustradas, em ordem cronológica, as atividades realizadas para a elaboração do projeto, construção e execução do experimento.

Data	Registro de atividades
01/06/2019	Pesquisa em sites, artigos e vídeos no <i>YouTube</i> .
06/06/2019	Seleção dos experimentos para análise. Análise dos experimentos e escolha do tema para o projeto.
11/06/2019	Leituras e pesquisas acerca do tema escolhido.
14/06/2019	Levantamento de dados e materiais para a confecção do experimento.
19/06/2019	Confecção do experimento.
24/07/2019	Apresentação do projeto.

Quadro 1 – Cronograma de atividades.

Fonte: Própria dos autores/2019.

Para a construção do “Trem magnético simples” foram selecionados os materiais que melhor se adequavam com a proposta inicial: a elaboração de um experimento caseiro simples. Os componentes utilizados para a confecção do experimento são de fácil obtenção, os quais podem ser encontrados em lojas de construção, lojas de eletroeletrônicos e em supermercados. Para o funcionamento do trem magnético são necessários os seguintes materiais:

- 1 pilha AAA (diâmetro de 1 mm);
- 2 ímãs (circulares) de neodímio, com diâmetros de 1,5 mm;
- 1 rolo de arame de estanho de 1 mm de espessura;
- 1 cilindro para modelar o estanho, com um diâmetro de aproximadamente 3mm;
- 1 tábua de madeira com 40 cm de comprimento e 30 cm de largura.

A primeira parte do experimento foi a escolha de uma base de suporte para o arame de estanho, para isto, foi utilizada uma tábua de madeira (a escolha desse material foi devida a sua rigidez).

Para a segunda parte, tem-se a montagem dos trilhos do trem. Primeiramente é necessário modelar o arame de estanho em um formato helicoidal, como um solenoide, para isso, usou-se um cilindro que possuía um diâmetro maior do que o diâmetro do ímã, cerca de 3 mm, para manter o formato helicoidal, todas as voltas foram colocadas o mais próximo possível umas das outras, logo depois de concluído os trilhos, fixou-se na base de madeira, como mostrado na figura a seguir (Figura 1).



Figura 1 - Montagem do trem magnético.

Fonte: Própria dos autores/2019.

As polaridades dos ímãs foram definidas usando uma bússola. Para identificá-los, pintou-se o polo norte dos dois ímãs de vermelho, e então foram fixados nas extremidades (positivo e negativo) da pilha de forma que os polos de mesmo nome ficassem nas extremidades.

Após a configuração da pilha e dos ímãs, colocou-se o conjunto (pilha e ímãs) dentro do solenoide, modelado com o cilindro, e para o ímã iniciar o movimento, foi necessário um primeiro impulso. O projeto foi apresentado seguindo os passos:

- Apresentação do contexto histórico dos trens eletromagnéticos e do experimento, seguida da abordagem dos conceitos físicos acerca dos mesmos.
- Execução do experimento
- Discussão sobre a explicação física da atividade experimental com o professor e os colegas de turma em sala de aula.

3 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após iniciar o movimento do conjunto pilha e ímãs (trem) dentro do formato modelado de estanho (trilhos), o conjunto pilha e ímãs percorreu todo o comprimento da pista. Este movimento se justifica em virtude da interação magnética entre o campo magnético do eletroímã formado pelo solenoide-pilha, e os campos magnéticos dos ímãs.

De acordo com o posicionamento predefinido dos ímãs na pilha, a força magnética proveniente da interação do eletroímã com os dois ímãs possui a mesma direção e sentido, a qual fez mover o conjunto pilha e ímãs. A figura 2 ilustra as posições dos ímãs, e a direção

e o sentido da força magnética.

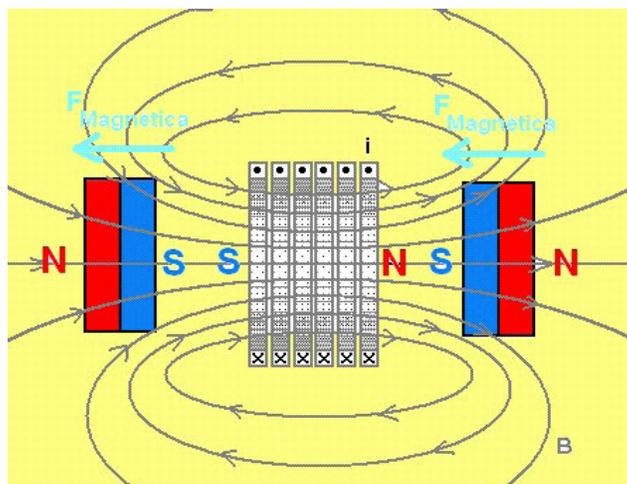


Figura 2 - Posição dos ímãs e sentido da força magnética.

Fonte: https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcRPrpq7hcuADL5WbVwMmik46Fuq94U9P9Q2o5FGlldVbdy4dd_Jw

Desta forma, as posições dos ímãs nas quais os polos de mesmo nome ficam nas extremidades, ou seja, NS e SN causa uma interação de atração, nesse caso do lado direito, sendo que no lado esquerdo a interação é de repulsão, fazendo com que a força magnética dos dois lados tenha o mesmo sentido, na qual ocorreu a geração do movimento.

É importante observar que o conjunto pilha e ímãs dentro do solenoide de estanho só fecham um circuito elétrico, e consequentemente o eletroímã, porque os ímãs funcionam como condutores, então a pilha gera uma corrente elétrica que passa pelo ímã e em seguida no solenoide. Quando o conjunto pilha e ímãs são arrastados, a distribuição espacial da corrente no enrolamento acompanha o conjunto, garantindo que a força magnética continue a existir sobre ele.

4 | CONCLUSÕES

Após a apresentação do projeto foi feita uma reflexão analítica sobre a construção histórica do experimento, como também sobre os conceitos físicos envolvidos no funcionamento e suas interações. Por meio desse projeto, pôde-se ter uma noção histórica do surgimento dos conceitos físicos sobre o magnetismo, foi possível observar as possíveis interações entre tais conceitos, e principalmente, foi praticável a construção de um experimento que simula um caso prático real de um trem magnético, o qual relaciona todos esses conceitos. Ao analisarmos o experimento, pode-se identificar as seguintes

leis envolvidas: Lei das interações dos polos magnéticos; Lei de Biot-Savart, que são fundamentais no estudo do eletromagnetismo.

AGRADECIMENTOS

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí (IFPI), campus Picos.
Turma de Licenciatura em Física 2016.1 (IFPI).

REFERÊNCIAS

FULFARO, Iberê. **Trem magnético caseiro**. Canal Manual do Mundo, 2017. Disponível em: <<<https://www.youtube.com/watch?v=eTjrWF8sOHw>>> Acesso em: 31 de maio de 2019.

HALLIDAY, D; RESNICK, R; WALKER, J. Fundamentos de Física, volume 3: Eletromagnetismo, 9° ed. – Rio de Janeiro: LTC, 2013.

MACHADO, K. D. **Eletromagnetismo**: volume 2 / Kleber Daum Machado. Ponta Grossa: Todapalavra, 2013.

MONTEIRO, H. R, A. SILVA O. D. **Manual para a construção de experimentos sobre eletromagnetismo**. Sociedade Brasileira de Ensino de Física, UFSCar – Sorocaba, Novembro de 2018.

SILVA, D. C. M. “Conhecendo as propriedades dos ímãs”; Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilescola.uol.com.br/fisica/conhecendo-as-propriedadesdos-imas.htm>. Acesso em 31 de maio de 2019.

PIÕES, SPINERS E GIROSCÓPIOS, BRINQUEDOS E APLICAÇÕES FÍSICAS

Data de aceite: 01/03/2021

Gabrielly Maria Camargo de Jesus
UEM

João Marcos Fávaro Lopes
UEM

Leandro Moraes Azevedo
UEM

Luiz Felipe Demétrio
UEM

Pedro Haerter Pinto
UEM

Marcos Cesar Danhoni Neves
UEM

RESUMO: Partindo dos conteúdos ensinados no curso de graduação em Física relacionados à dinâmica de rotações, o trabalho explica o funcionamento do giroscópio, pião, tip-top e spinner, os quais, apesar de serem normalmente utilizados para recreação, possuem também aplicações educacionais e outras utilidades muito interessantes de serem exploradas na área de Ensino de Física.

PALAVRAS - CHAVE: Brinquedos. Rotação. Ensino de Física.

ABSTRACT: The first magnets that humanity knew was in antiquity. Magnetic phenomena are all the interactions observed between magnets,

so the term magnetism has come to be used to study the phenomena and properties that surround magnets. A solenoid, when traversed by an electric current, creates a magnetic field inside and outside, the experiment set up for the construction of this work was called Magnetic Train, where the main idea was to demonstrate the magnetic effect of a magnet on a solenoid, the assembly is made with materials of relative access. The experiment was built and presented by students of the Electromagnetism Laboratory discipline of the Physics Degree course.

KEYWORDS: Experiment, Electromagnetism, Magnetic Fields.

1 | INTRODUÇÃO

Platão já estudava os movimentos celestes, partindo de uma concepção de geocentrismo, considerando estes movimentos como circulares e harmônicos. Surgiu, assim, um grande interesse em estudar objetos que rotacionassem ou que apresentavam ciclos. Com Newton, no século XVII, toda a Mecânica foi revolucionada, uma vez surgiram foram cunhados os conceitos de Força, Torque, Momento Angular e Linear, utilizando estas ferramentas matemáticas que tomariam a forma, posteriormente, de notação vetorial. Com esta matematização da natureza, foi possível estudar com precisão os movimentos e ações descritos por objetos em rotação.

2 | FIDGET SPINNERS

Os chamados *fidget spinners* ou *hand spinners* tiveram origem em 1996 quando Catherine Hettinger teve a ideia de criar um brinquedo para crianças com distúrbios de ansiedade. Porém, não conseguindo lançar o produto em grande escala, em 2005 ela desistiu da patente. No início do ano de 2017 um brinquedo muito similar ao projetado por Catherine foi lançado e se espalhou em grande escala por todo o mundo, passando a ser fabricado por diversas marcas de brinquedos infantis.

Basicamente o fidget spinner é um brinquedo em forma de hélice (imagem 1) que tem geralmente de duas a três pás (braços). No centro há um rolamento e na extremidade de cada braço há um elemento metálico que torna a massa da estrutura do spinner, geralmente plástica, desprezível.

Para utilizar o brinquedo, geralmente segura-se o rolamento utilizando os dedos polegar e indicador de uma mão e, com a outra, aplica-se uma força em um dos braços do spinner, fazendo-o girar. Com essa rotação surgirá um momento angular no sentido do torque e, ao movimentar o spinner, o momento é sentido como uma força resistente ao movimento da translação do brinquedo.

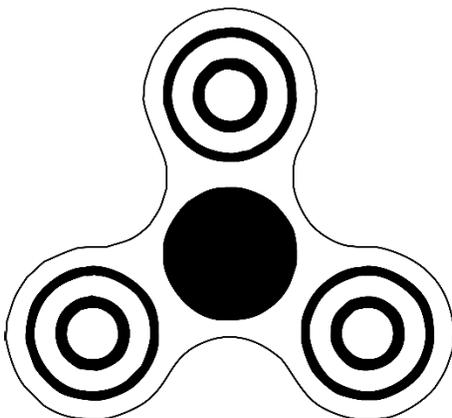


Imagem 1 - Modelo de *fidget spinner*.

Fonte: DEPOSITPHOTOS, 2017 (adaptado pelos autores)

2.1 Funcionamento

Uma das principais diferenças entre os spinners é a velocidade e o tempo de duração da rotação após aplicar o torque. Considerando um spinner (imagem 2) de massa k com n “braços” o seu momento de inércia I será:

$$I = M_1r_1^2 + M_2r_2^2 + \dots + M_nr_n^2$$

onde M é a massa do “braço” e r o seu comprimento. Em um caso onde todos os braços são iguais, tem-se que,

$$I = nMr^2,$$

onde I é o momento de inércia do spinner.

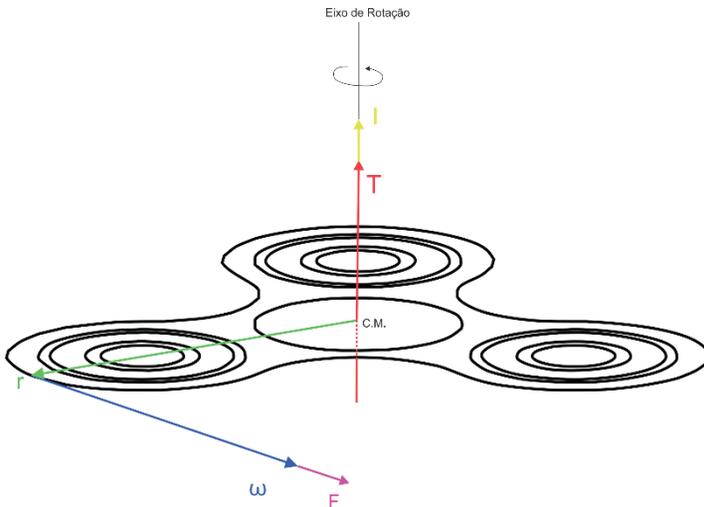


Imagem 2 - Grandezas presentes na rotação do spinner.

Fonte: DEPOSITPHOTOS (adaptado)

Vale ressaltar que quando o spinner está rotacionando de forma equilibrada no espaço, o sentido do torque e do momento angular são o do eixo de rotação do spinner, sendo que este eixo é o que passa pelo centro de massa e é normal ao plano do movimento de rotação do brinquedo.

3 | PIÕES

A origem do pião é incerta, entretanto existem evidências de que este existe desde o ano 4000 a.C. graças a registros arqueológicos na antiga Mesopotâmia. O pião foi trazido ao Brasil pelos portugueses e se espalhou rapidamente pelo território nacional, sendo muito popular até os dias hodiernos.

O pião consiste em um brinquedo normalmente feito de madeira, que remete à clássica e popular brincadeira de enrolar um cordão em sua ponta e puxar rapidamente

fazendo com que este entre em estado de rotação, ficando em pé até o fim do movimento. Apesar de seu simples funcionamento, possui uma grande importância para a mecânica clássica.

3.2 Funcionamento

O pião mantém-se em pé enquanto gira devido à conservação do momento angular (L), que tem como direção o eixo de rotação do brinquedo. Para que a direção do momento angular mude, é necessário que haja um agente externo que faça mudar sua direção, nesse caso, um torque (T).

Quando o movimento de rotação do pião se inicia (imagem 3), seu eixo e seu momento angular têm direção vertical. Conforme continua a girar, este perde velocidade devido ao atrito com o chão. Essa queda na velocidade gera outro torque, que faz com que ele se incline, criando um certo ângulo θ entre o chão e o eixo de rotação. Esse movimento é chamado de *precessão do pião*. Neste instante, o momento angular sofre a mesma inclinação que o eixo de rotação, fazendo com que ele e o torque se dissipem pelo atrito.

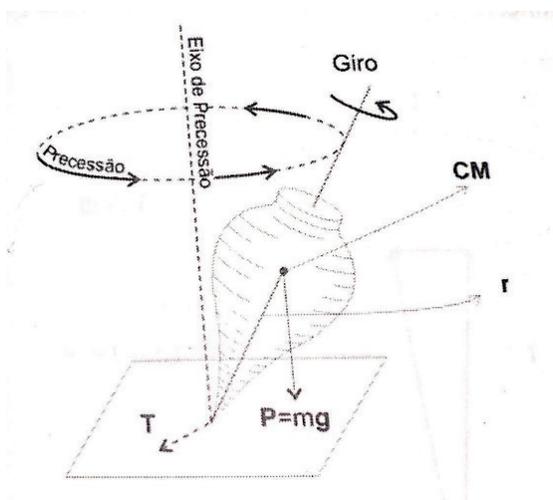


Imagem 3 - Esquema do movimento de precessão do pião.

Fonte: NEVES, M. C. D.; PEREIRA, R. F., 2006, p. 91

O torque (T) produzido é paralelo ao solo e perpendicular à força peso e ao momento angular. É importante ressaltar que ele não vai alterar a intensidade do momento angular, apenas a sua direção. O pião continua sob a ação do torque até que se deite no chão (fim do movimento). Por definição:

$$T = r \times m \cdot g \text{ ou seja } T = r \cdot m \cdot g \cdot \cos\theta$$

Ainda, considerando dt como um pequeno intervalo de tempo e dL um infinitésimo de L , tem-se:

$$T = \frac{dL}{dt} \rightarrow dL = T dt$$

Essa equação descreve um cone (imagem 4), o que explica o fato de a precessão do peão ocorrer nessa forma.

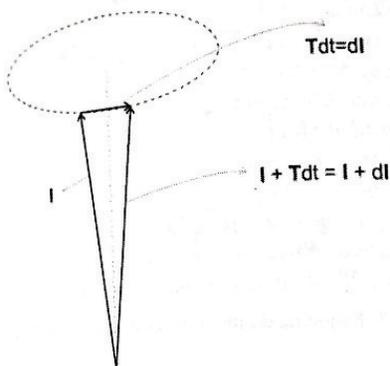


Imagem 4 - Esquema de ação do torque na precessão do pião.

Fonte: NEVES, M. C. D.; PEREIRA, R. F., 2006, p. 92

3.3 Pião Tip-Top

Um outro tipo de pião bastante conhecido, além do tradicional, é o tip-top (Imagens 5 e 6). Por ter uma base arredondada ao invés de uma agulha, é mais fácil colocá-lo em rotação. Quando posto em rotação, devido ao atrito de sua base com o chão, o tip-top tende a se inverter.

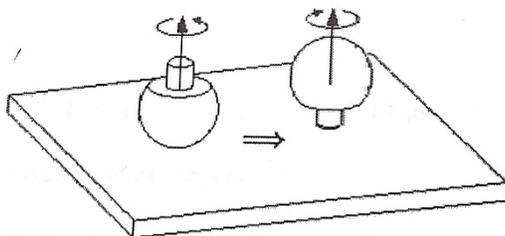


Imagem 5 - Tip-top em funcionamento.

Fonte: NEVES, M. C. D.; PEREIRA, R. F., 2006, p. 94

Ao girar o tip-top, a força de atrito que surge é perpendicular ao plano em que está girando, exatamente em seu ponto de apoio. Desse ponto de apoio até seu centro de massa há um “braço de alavanca” que causa um torque que permite que o pião se inverta. Assim, quanto mais áspera a superfície, mais rápido o pião se inverterá.

É possível montar uma pião tip-top utilizando 4 bolinhas de gude do mesmo tamanho e durepoxi. Basta colar três bolinhas juntas em de triângulo e adicionar a quarta no incentro da figura, formando uma pirâmide. Ao colocar o tip-top numa superfície apoiado na base triangular, deve-se rotacioná-lo pela bolinha restante. Após certo tempo o tip-top se inverterá e começará a rotacionar apoiado nesta.

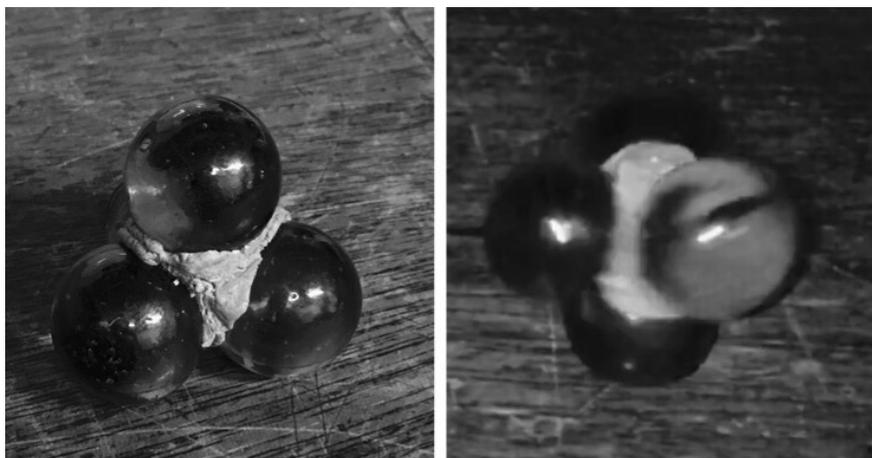


Imagem 6 - Tip-top feito com bolinhas de gude e em repouso em rotação.

Fonte: Elaborada pelo autor

4 | GIROSCÓPIO

O nome “giroscópio” (imagem 7) foi criado pelo físico francês Léon Foucault, o qual utilizou o princípio de conservação do momento angular para criar um experimento relativamente simples capaz de provar a existência do movimento de rotação da Terra.

Um giroscópio é essencialmente formado por um rotor perfeitamente balanceado que gira livremente entre seus eixos geométricos perpendiculares entre si que se interceptam no centro de massa do rotor. Quando posicionado numa suspensão é denominado de tipo *Cardan*. O giroscópio, quando em rotação, pode adquirir qualquer orientação, porém seu centro de massa deve estar sempre fixo no espaço.

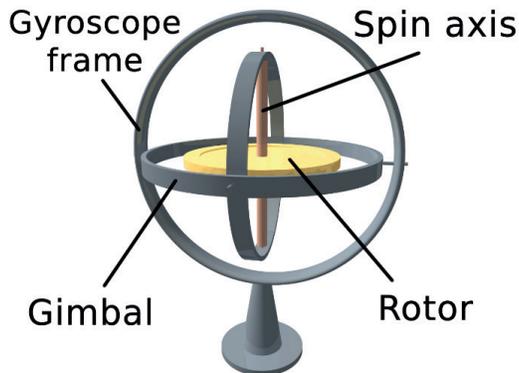


Imagem 7 - Giroscópio em suspensão Radan.

Fonte: WIKIMEDIA, 2017.

Devido à ação da inércia giroscópica, o rotor tende a conservar sua direção no espaço, independentemente dos movimentos aplicados no mesmo. Ou seja, a inércia giroscópica é uma propriedade que o giroscópio tem em manter seu centro de massa na mesma posição.

Para entendermos a experiência de Foucault imaginemos um giroscópio na posição A (imagem 8) da figura, com eixo do volante apontando para a horizontal, e cuja direção deve permanecer constante durante todo o movimento. Se a Terra não girasse, este deveria permanecer sempre na horizontal, porém, o observado é que, após algumas horas, quando o objeto estiver em B, a direção do eixo agora é a vertical, comprovando a rotação de nosso planeta.

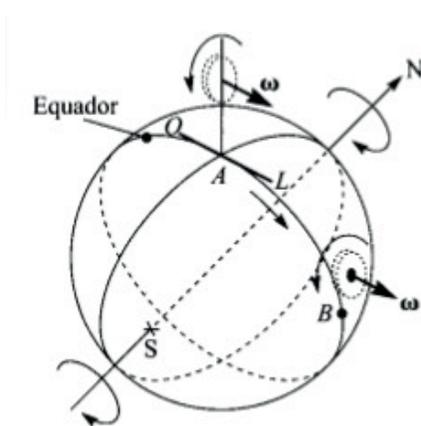


Imagem 8 - Experimento esquematizado de Foucault.

Fonte: NUSSENZVEIG, 2002, p.276

O experimento original ocorreu em Paris no ano de 1851. Foucault posicionou um giroscópio conhecido como Pêndulo de Foucault no Panthéon, cuja direção do eixo de rotação do volante variava de acordo com esperado para o movimento de rotação da Terra.

O fato de a direção do eixo de rotação do giroscópio se conservar permite utilizá-lo em diversas áreas. Pode ser usado em navegação marítima, aérea e espacial para evitar que o veículo se distancie de uma direção pré-estabelecida, tarefa que este efetua com grande precisão, uma vez que é minimamente afetado por perturbações eletromagnéticas ou pela inclinação lateral/longitudinal do transporte. Possui também aplicações militares, sendo utilizado para guiar mísseis teleguiados, além de seu emprego na orientação da perfuração de poços de petróleo.

5 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo analisou o funcionamento de brinquedos envolvidos com a rotação com foco nos princípios físicos (velocidade e aceleração angular, centro de massa, momento de inércia, torque, momento angular e sua conservação) que explicam tal movimento.

O caráter experimental da Física torna necessárias demonstrações experimentais para facilitar o aprendizado, tarefa que não é possível ser realizada para todas as áreas dessa ciência, uma vez que, na maioria dos casos, faltam recursos para sua consecução. Além disso, os estudantes passam uma grande parte do tempo de estudo resolvendo problemas distantes de seu cotidiano. A utilização dos brinquedos em sala de aula para demonstrar os conceitos físicos previamente citados resolve parcialmente estes problemas, aproximando o dia-a-dia dos alunos do estudo da Física, tornando a experiência mais prazerosa e gerando resultados que podem consolidar o aprendizado.

REFERÊNCIAS

CELSONI, L. S.; FREITAS, L. A.; COSTA, V. A. G.; *Estudo da dinâmica das rotações e aplicações automotivas como sistema de controle de estabilidade*. 43 f. Monografia – Curso de Eletrônica Automotiva, Faculdade de Tecnologia Santo André, Santo André, São Paulo, 2015.

DEPOSITPHOTOS. In: https://st3.depositphotos.com/5740576/16042/v/450/depositphotos_160421678-stock-illustration-fidget-spinner-outline-technical-drawing.jpg. Acesso em: 10 ago. 2017.

NEVES, M. C. D.; PEREIRA, R. F. *Divulgando a Ciência: de brinquedos, jogos e do vôo humano*. Maringá: Massoni, 2006. 160 p.

NUSSENZVEIG, M. *Curso de Física Básica 1 – Mecânica*, 4ª Edição – São Paulo: Edgard Blücher, 2002.

FIDGET SPINNER. In: WIKIPÉDIA, a enciclopédia livre. Flórida: Wikimedia Foundation, 2017. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Fidget_spinner&oldid=49650461>. Acesso em: 11 ago. 2017.

PIÃO. In: WIKIPÉDIA, a enciclopédia livre. Flórida: Wikimedia Foundation, 2017. Disponível em: <<https://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Pi%C3%A3o&oldid=49221450>>. Acesso em: 10 ago. 2017.

TREBUCHET: EFEITO DA RESISTÊNCIA DO AR NO MOVIMENTO DE PROJÉTEIS

Data de aceite: 01/03/2021

Data de submissão: 05/02/2021

José Flávio Marcelino Borges

Departamento de Física - Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG) Ponta Grossa – PR – Brasil
<http://lattes.cnpq.br/5284206270025865>

Ráfaga Wiecheteck Vurobi

Departamento de Física - Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG) Ponta Grossa – PR – Brasil
<http://lattes.cnpq.br/8353438166616752>

Lucas Stori de Lara

Departamento de Física - Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG) Ponta Grossa – PR – Brasil
<http://lattes.cnpq.br/2054552041766094>

Fabiana Cristina Nascimento Borges (Em memória)

Departamento de Física - Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG) Ponta Grossa – PR – Brasil
<http://lattes.cnpq.br/1243785211886291>

RESUMO: O presente trabalho tem por finalidade o estudo de trajetórias bidimensionais de forma integrada, aliando a confecção de uma catapulta caseira, em escala, no estilo Trebuchet à realização de um estudo aprofundando dos conceitos físicos necessários para descrição de seu funcionamento, bem como, a dedução de funções parabólicas capazes de prever com

considerável exatidão a real trajetória de um projétil sob efeito, unicamente, da força resistiva do ar. A extração de dados experimentais e simulações das trajetórias, foram obtidas por intermédio do software livre Tracker, ferramenta de vídeo-análise voltada para o ensino, e linguagem de programação em Fortran 90.

PALAVRAS - CHAVE: Lançamento de projétil; Constante da força de retardo; Trebuchet; Tracker, Fortran 90.

TREBUCHET: EFFECT OF THE AIR RESISTANCE ON THE PROJECTILE MOVEMENT

ABSTRACT: The present work has the purpose the study of two-dimensional trajectories in an integrated manner, combining the building a homemade catapult in scale in the Trebuchet style and the realization of a deep study of the physical concepts necessary for the description of its operation, as well, the deduction of parabolic functions able to predict with considerable accuracy the real trajectory of a projectile under the effect of the resistive force of the air, only. The extraction of experimental data and trajectory simulations, were obtained through the free software Tracker, a video-analysis tool aimed at teaching, and the Fortran 90 programming language.

KEYWORDS: Projectile launch; Drag coefficient; Trebuchet; Tracker, Fortran 90.

1 | INTRODUÇÃO

O processo de aprendizagem dos conceitos de Física, pode ser facilitado com a experimentação e a produção manual, por parte dos alunos, de modelos que simulem os conteúdos propostos em aula. (BORGES, 2006) Neste sentido foi proposto aos alunos do Curso de Bacharelado de Física da Universidade Estadual de Ponta Grossa um estudo detalhado do deslocamento balístico de um projétil, lançado através de uma catapulta clássica denominada Trebuchet.

O advento do Trebuchet remonta aos povos chineses que, entre os séculos V e III AC, desenvolveram um modelo primitivo que dependia exclusivamente da força humana no acionamento da arma de cerco, via conjunto de cordas e polias (CHEVEDDEN, 1995; SAIMRE, 2006). A partir do século XII DC, especialmente em países islâmicos, bizantinos e em áreas mediterrâneas da Europa, há relatos do emprego do Trebuchet operado por ação de contra peso no arremesso de seus devastadores projéteis. A França figura como o primeiro país europeu a empregar o modelo de acionamento por contra peso (ANNOSCIA, 2018).

Devido a sua simplicidade de construção e emprego, o Trebuchet resistiu bravamente frente ao surgimento dos primeiros canhões a base de pólvora e, somente por volta do século XV DC, teve seu emprego gradativamente descontinuado devido a novos canhões capazes de rivalizar com o poder de destruição da arma de cerco (SAIMRE, 2006).

Neste contexto histórico, o conhecimento da mecânica teve que ser desenvolvido portanto, é justo dizer que o trebuchet contribuiu para o progresso da ciência à sua maneira.

Aliando os conhecimentos históricos aos princípios básicos de mecânica, busca-se a confecção de um modelo caseiro em escala reduzida do Trebuchet. Neste trabalho faz-se um estudo didático do funcionamento deste aparato com auxílio do software Tracker (PARREIRAL 2018) e linguagem Fortran 90, bem como a comparação das trajetórias parabólicas, modeladas para condições ideais (sem forças dissipativas) ou adaptadas, unicamente, para presença de um fator da intensidade da força de amortecimento no sistema.

A construção da catapulta pode ser feita de forma caseira e com material reciclado. Deve servir de estímulo aos alunos do ensino médio e graduação dos cursos de exatas e engenharias a entender a física por trás do funcionamento de uma antiga arma de guerra.

1.1 Trebuchet

O Trebuchet consiste em um conjunto composto por duas partes básicas: a estrutura de sustentação e as partes móveis. O funcionamento resume-se ao movimento das partes móveis sobre sua estrutura base, permitindo que a alavanca juntamente com o contrapeso arremesse o projétil através do estilingue. A imagem da figura 1, a seguir, ilustra o arranjo descrito.

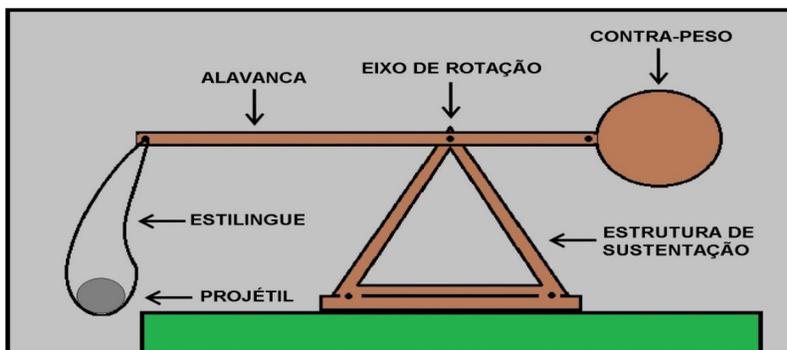


Figura 1 – Arranjo esquematizado de um Trebuchet

Conforme descrito acima, o projeto em miniatura baseia-se no modelo histórico, apresentando algumas alterações necessárias devido às limitações nos materiais disponíveis. Podemos visualizar as dimensões do protótipo na figura 2 e ele confeccionado na figura 3, de acordo com as especificações anteriormente mencionadas.

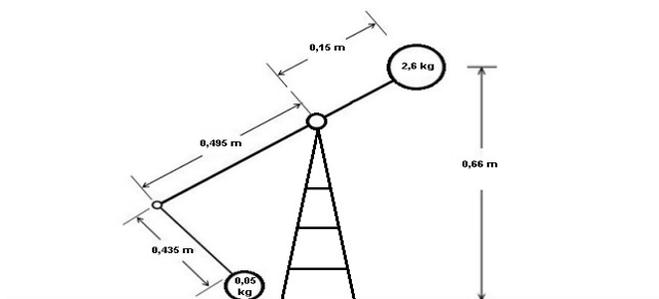


Figura 2 – Esquema das dimensões do protótipo.



Figura 3 – Imagem contendo o modelo em escala do Trebuchet construído de acordo com as especificações propostos.

O projétil utilizado nos lançamentos foi um corpo de prova com dimensões comparáveis a um geóide, sendo confeccionado artesanalmente com massa adesiva epóxi e com aproximadamente 50 g.

A obtenção dos valores correspondentes à velocidade inicial (v_0), tempo de voo (t_v), alcance máximo (A_{max}), ângulo de arremesso (θ), distância do projétil ao centro da alavanca (r), entre outros parâmetros; foram aferidos através da recordação em vídeo para cada lançamento e sua posterior análise por meio do software livre Tracker. A região para lançamentos foi limitada para um alcance máximo de 11,5 m onde a posição inicial (x_0) corresponde à média das posições no instante em que ocorre o desprendimento entre o corpo de prova e o aparato. A construção gráfica e análise das trajetórias – nas condições sem arrasto e com arrasto – foram intermediadas por um algoritmo escrito em linguagem Fortran 90.

1.2 Trebuchet e o movimento de projétil

A energia envolvida no processo é simplesmente a energia potencial gravitacional U , dada pela equação (1) a seguir:

$$U = mgh \quad (1)$$

com uma aceleração gravitacional g e de módulo constante de aproximadamente $9,79 \text{ m/s}^2$ – Ponta Grossa, Paraná.

Fica evidente que ao acionarmos o Trebuchet, no instante em que o contra peso é liberado, um movimento semelhante ao de queda livre se iniciará, convertendo toda U acumulada no sistema em energia cinética de rotação, cinética de translação e em energias dissipativas – atrito, calor, som, etc., resultando no arremesso do projétil que se encontra na outra extremidade do artefato (HALLIDAY, 2009)

De todas as peças que compõem o Trebuchet, pode-se dizer que a alavanca é aquela que desempenha um papel chave em seu funcionamento. O torque resultante τ_{Res} sobre o sistema (HALLIDAY, 2009; NUSSENZVEIG, 2002), segue a equação abaixo:

$$\tau_{Res} = F_p r \text{ sen } \theta \quad (2)$$

Conforme o conjunto realiza um movimento de rotação devido ao torque resultante, o corpo de prova se desloca de sua posição inicial até atingir o ponto de sua liberação do estilingue. Durante o deslocamento, há uma ampliação na distância r que separa o projétil do eixo de rotação bem como um aumento gradativo no momento de inercia total I_{Total} e no módulo da velocidade angular ω na extremidade composta pela alavanca, estilingue e corpo de prova. Como resultado, parte da energia potencial gravitacional U é convertida em energia cinética de rotação K_r . A imagem da figura 4, nos mostra a realização do movimento, de forma que K_r acaba sendo escrita como:

$$K_r = \frac{1}{2} I_{Total} \omega^2 \quad (3)$$

Onde temos o momento de inercial total (I_{Total}) e módulo da velocidade angular (ω). O momento de inércia (NUSSENZVEIG, 2002) do conjunto no instante do lançamento será descrito por:

$$\begin{aligned} I_{Total} &= I_{Haste} + I_{Bola} \\ I_{Total} &= \frac{1}{12} M r^2 + m r^2 \end{aligned} \quad (4)$$

com M à massa da haste e m à massa do corpo de prova.

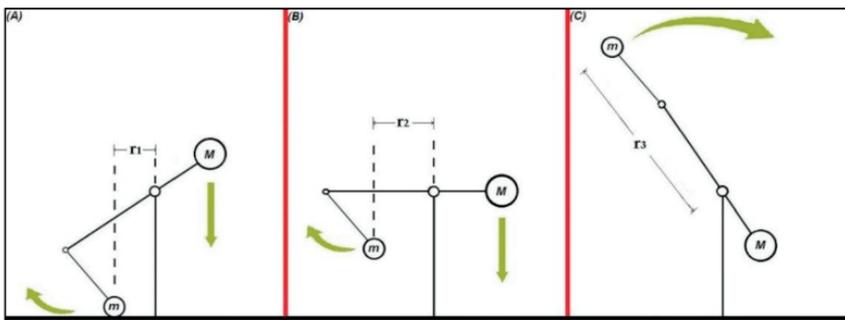


Figura 4 – Representação das posições do projétil durante o lançamento e a variação da distância até seu eixo de rotação.

Após a rotação da alavanca temos a liberação do objeto pelo estilingue, arremessando-o com uma velocidade inicial v_0 e com uma trajetória parabólica. A razão por trás de tal funcionamento reside no fato de que, parte da energia potencial gravitacional é transformada – além da energia cinética de rotação – em cinética de translação, $K_T = \frac{1}{2}mv_0^2$, apresentando valor máximo no instante t_0 da liberação do corpo (NUSSENZVEIG, 2002).

Numa primeira análise, se executássemos o arremesso sob condições ideais, sem atrito e somente a gravidade agindo sobre o corpo, obteríamos uma função parabólica (MARION, 1988) de y em função de x que pode ser descrita por:

$$y(x) = y_0 + x \tan \theta - x^2 \frac{g}{2v_0^2 \cos^2 \theta} \quad (5)$$

Um olhar atento nos revela que a equação (5) corresponde a uma função do 2º grau onde o coeficiente a corresponde aos valores $g/2v_0^2 \cos^2 \theta$, b equivale à $\tan \theta$ e c associa-se a y_0 . Embora válida, a mesma desconsidera a resistência oferecida pelo ar – ou arrasto – durante o deslocamento, responsável por reduzir os módulos de $y(x)$ e v_0 .

Se desejamos modelar o comportamento de um corpo em trajetória parabólica sob efeito de uma força resistiva e , considerando somente a influência do arrasto (CHANG, 2019), podemos assumir que o módulo da força resistiva F_{RES} será proporcional ao módulo da velocidade v do projétil conforme abaixo:

$$F_{RES} \propto v^n \quad (6)$$

Quando objetos pequenos se deslocando com velocidades que sejam aproximadamente menores que 24 m/s, o fator n assume um valor de $n \cong 1$ (MARION, 1988). Logo, o módulo da força resistiva que atua sobre o corpo de prova será:

$$F_{RES} = -mkv \quad (7)$$

Conseqüentemente, devemos reescrever a equação (5) para que a constante positiva k possa ser levada em consideração, e que mais adiante, possibilitará uma modelagem com exatidão do movimento de um corpo sujeito ao arrasto, após seu arremesso. Assim sendo, consideremos o esboço do movimento de projétil sob efeito de uma força resistiva através da figura 5.

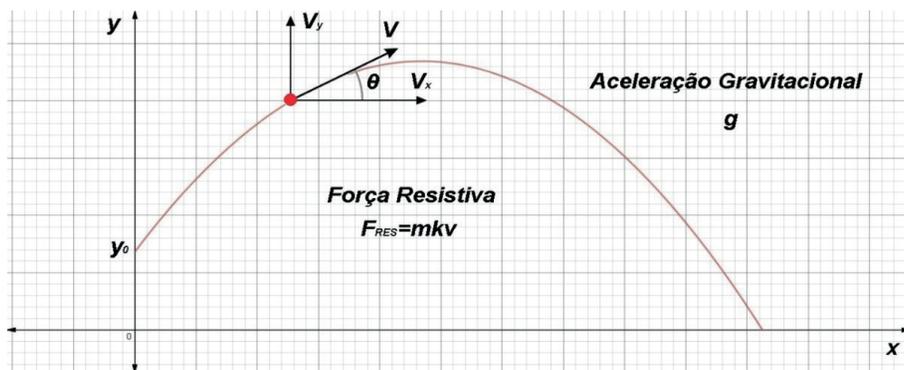


Figura 5 – Representação, em coordenadas retangulares, da trajetória parabólica de um corpo influenciado pela força de arrasto.

A expressão que satisfaz o modelo de Trebuchet analisado é (MARION, 1988):

$$y(x) = y_0 + \frac{g}{k^2} \ln \left| 1 - \frac{kx}{v_0 \cos \theta} \right| + \left(\frac{kx}{v_0 \cos \theta} \right) \left(\frac{g + kv_0 \sin \theta}{k^2} \right) \quad (8)$$

A equação (8) consiste na solução geral para trajetórias parabólicas de projéteis sob efeito de uma força resistiva do tipo $F_{RES} = -mkv$. Os parâmetros expressos em (8) podem ser identificados como sendo: equação parabólica da posição vertical em função da posição horizontal do projétil ($y[x]$), altura inicial do projétil (y_0), módulo da aceleração da gravidade local (g), constante associada à intensidade da força de amortecimento (k), módulo da velocidade inicial do projétil (v_0), posição horizontal do projétil (x) e o ângulo de arremesso do projétil (θ).

1.3 Vídeo-análise do movimento e linguagem fortran 90

A obtenção de parâmetros físicos para o estudo das propriedades mecânicas do Trebuchet ocorreu por intermédio do software de vídeo-análise Tracker (PARREIRAL, 2018) e a linguagem de programação Fortran 90. (ANAGNOSTOPOULOS, 2016) O primeiro é capaz de fornecer dados experimentais atrelados às trajetórias de corpos em movimento enquanto que, o segundo, permite o desenvolvimento de programas executáveis capazes de compilar e manipular dados de acordo com o que se deseja analisar.

O software Tracker apresenta uma barra de ferramenta poderosa contendo

comandos de ajuste e análise, a saber: eixo de coordenadas – permite orientar o sistema através de coordenadas retangulares definido em unidades de pixel, além de comportar o ajuste do ângulo formado entre o eixo e o plano do vídeo –, fita de calibração – possibilita que o software calibre o tamanho dos objetos em vídeo com suas dimensões reais –, bastão de medição – permite a extração precisa das dimensões dos objetos contidos em vídeo, estando dependente da utilização correta da fita de calibração –, ponto de massa – possibilita a inclusão da massa e rastreamento da trajetória do objeto retornando valores de grandezas físicas associadas à posição e massa –, entre outras opções.

A imagem da figura 6 exemplifica a funcionalidade das ferramentas eixo de coordenadas, fita de calibração, bastão de medição, ponto de massa, visualização de trajetória; disponibilizadas pelo software Tracker (PARREIRAL, 2018).

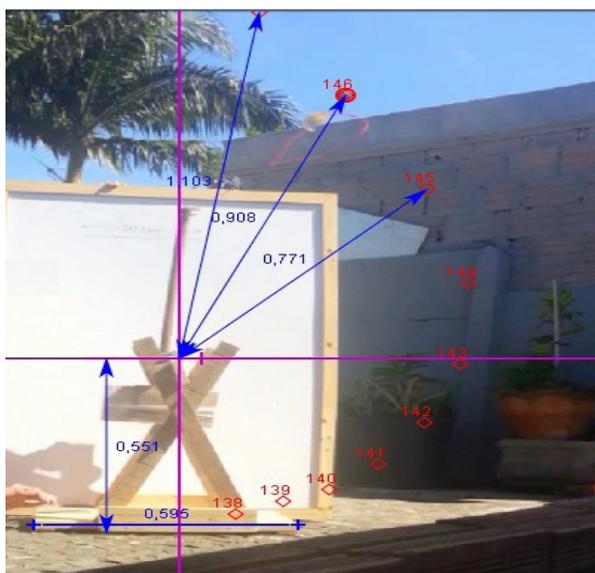


Figura 6 – Imagem extraída da análise do Teste nº5 do corpo de prova.

Por intermédio da linguagem em Fortran 90 (ANAGNOSTOPOULOS, 2016) desenvolveu-se um algoritmo contento os parâmetros experimentais específicos do corpo de prova. Desta forma, obteve-se uma comparação gráfica entre as trajetórias descritas nas condições sem atrito (ideal) e na presença, somente, da ação dissipativa da resistência do ar (intermediada pelo fator da força de amortecimento).

A tabela abaixo apresenta os comandos necessários para o desenvolvimento do algoritmo já mencionado.

```

program Projtil
  implicit none
  !!!!!!!DECLARAÇÃO DAS FUNÇÕES!!!!!!
  real :: y
  write(*,*)y()
end program Projtil
real function y()
  implicit none
  !!!!!!!DECLARAÇÃO DE VARIÁVEIS!!!!!!
  character(20),parameter :: inputfile ="Dados_A"
  character(20),parameter :: outputfile ="Resultados_A"
  integer,parameter :: n=104
  integer :: i
  real :: x(n),y1,y2
  real,parameter :: A1=0.151,B1=1.41,C1=1.362
  real,parameter :: k=0.175128387,h=1.362,g=9.79,V0=9.879,A=54.84
  !!!!!!!LEITURA DOS DADOS!!!!!!
  open(1,file=inputfile)
  open(2,file=outputfile)
  !!!!!!!CONDIÇÕES!!!!!!
  do i=1,n
    read(1,*)x(i)
  enddo
  do i=1,n
    y1=C1+B1*(x(i))-A1*(x(i)**2)
    y2=h+((g/k**2)*log(1-x(i)*k/V0*cos(A)))+(x(i)/V0*cos(A)*k**2)*(V0*sin(A))
    +(x(i)/V0*cos(A)*k**2)*(g/k)
    write(2,*)x(i),y1,y2
  enddo
  !!!!!!!FIM!!!!!!
  close(1)
  close(2)
end function

```

Tabela 1 – Programa Corpo_de_Prova em linguagem Fortran 90. A função y_1 denota a trajetória sem atrito enquanto que, a função y_2 , descreve a ação resistiva do ar.

2 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

Podemos condensar na tabela que segue os valores médios provenientes dos respectivos testes executados com o corpo de prova. Os testes resumiram-se a cinco lançamentos do projétil, procedimento mencionado anteriormente.

MASSA m (kg)	0,05
ALTURA INICIAL y_0 (m)	1,362
VELOCIDADE INICIAL v_0 (m/s)	9,879
TEMPO DE VOO t_v (s)	1,922
ALCANCE MÁXIMO $A_{m\acute{a}x}$ (m)	8,558
ÂNGULO DE LANÇAMENTO θ (graus)	54,84
ACELERAÇÃO GRAVITACIONAL g (m/s ²)	9,79

Tabela 2 – Valores médios dos parâmetros experimentais extraídos com auxílio da ferramenta Tracker.

Com auxílio das informações contidas na tabela acima e da equação 5, podemos construir uma função parabólica da suposta trajetória do corpo de prova na ausência da ação resistiva do ar. Portanto, considere abaixo:

$$y_{SA} = -(0,151)x^2 + (1,420)x + (1,362) \quad (9)$$

Onde a notação y_{SA} representa à função matemática do corpo de prova sem influência do atrito. Alternativamente, em posse da equação 8 que prevê a influência do arrasto sobre o corpo de prova – denotado por $y_{CA} - e$, limitando-a no intervalo $0 \leq x \leq 8,558$, realizou-se uma manipulação numérica do módulo da constante k_A de maneira que a função se aproximasse de zero ($y_{CA} \approx 0$) no instante $x \cong 8,558$, valor correspondente ao alcance máximo de A . Sendo assim, a função y_{CA} utilizada na manipulação matemática já descrita, encontrasse explícita abaixo:

$$y_{CA} = 1,362 + \left(\frac{9,79}{(k_A)^2} \right) \ln \left| 1 - \frac{xk_A}{(9,879)\cos(54,84)} \right| + x \left(\frac{\tan(54,84)}{k_A} + \frac{(9,79)}{(9,879)\cos(54,84)} \right) \quad (10)$$

Conforme o raciocínio prévio, o ajuste para constante K capaz de descrever satisfatoriamente a trajetória experimental do projétil equivale a $K = 0,175128387$ – ou, aproximadamente $0,175$ –, em unidades de s^{-1} . Conseqüentemente, a comparação entre a trajetória sem arrasto (cor azul) e com arrasto (cor vermelha) pode ser observada abaixo:

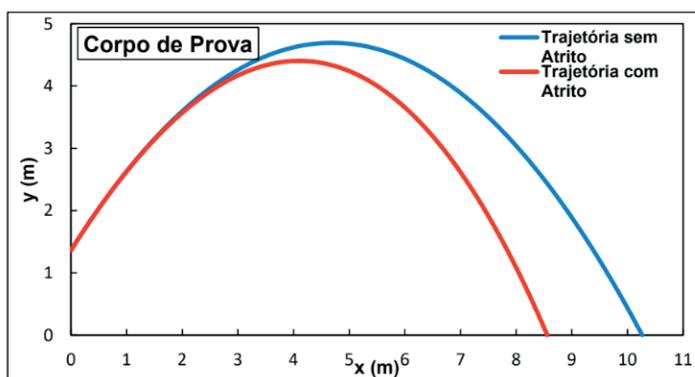


Figura 7 – Comparação entre as funções trajetória do corpo de prova.

Aplicando na equação 7 os parâmetros $m \cong 0,05$ kg, $v_0 \cong 9,879$ m/s e $k_A \cong 0,175$ s^{-1} teremos uma força resistiva diretamente proporcional a velocidade do corpo de prova com intensidade aproximada de:

$$F_{RES}^A \cong -0,086 \text{ N} \quad (11)$$

As trajetórias balísticas contidas na Figura 7 evidenciam uma clara influência do arrasto do ar em sistemas físico-mecânicos. Nota-se nesta figura, que para condições ideais descritas pela equação (9) o projétil teria um alcance total de aproximadamente 10,264 m. Não obstante, ao contabilizarmos os efeitos do arrasto na trajetória efetuada, podemos extrair duas informações expressivas: a redução significativa no módulo do alcance total, equivalente a 8,558 m, e a elevada acurácia das equações em fornecer o valor do alcance máximo teórico (8,5582 m) em relação ao valor experimental (8,558 m).

3 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

Observa-se que o modelo experimental criado neste trabalho está em excelente concordância com a simulação computacional. De sorte que o modelo proposto é adequado para o estudo balístico de projéteis.

Experimentalmente a catapulta, Trebuchet, aqui utilizada é uma ferramenta adequado para o estudo e determinação da resistência oferecida pelo ar na propagação de um projétil.

AGRADECIMENTOS

Ao programa de Iniciação Científica da Fundação Araucária, Laboratório Multiusuários da Universidade Estadual de Ponta Grossa.

REFERÊNCIAS

ANAGNOSTOPOULOS, K. N., **Computacional Physics**, National Technical University of Athens, 2ª ed., 2016.

ANNOSCIA, G. et al. **Virtual prototyping of medieval weapons for historical reconstruction of siege scenarios starting from topography and archaeological investigations**. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng, v. 364, n. 012098, 2018.

BORGES, J. F. M., GABRIEL, M. C., SALEM, R. E. P. **resistores não ôhmicos à base de água**, Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v. 23, n. 2, p. 267-276, 2006.

CHANG, J. O., et al., **Obtenção experimental do coeficiente de arrasto com o lançamento de foguetes de garrafas PET**, Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v. 36, n. 2, p. 529-542, 2019.

CHEVEDDEN, P. et al. **The Trebuchet**. Scientific American, v. 273, p. 66-71, 1995.

HALLIDAY, D. **Fundamentos de Física**, volume 1: Mecânica / David Halliday, Robert Resnick, Jearl Walker. 8ª edição – Rio de Janeiro: LTC, 2009.

MARION, J. B. and THORNTON, S. T., **Classical Dynamics of Particles & Systems**, Third Edition, 1988.

NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de física básica, volume 1: Mecânica** 4ª edição – São Paulo: Editora Edgard Blücher LTDA, 2002.

PARREIRAL, J. E., **Um curso de Mecânica com o uso do programa de videoanálise Tracker**, Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v. 35, n. 3, p. 980-1003, 2018.

SAIMRE, T. – **Trebuchet – A gravity-operated siege engine: A study in experimental archaeology**. Estonian Journal of archaeology, v. 10, n. 1, p. 61-80, 2006.

CAPÍTULO 9

JOGOS EDUCATIVOS ADAPTADOS COMO RECURSO DE APRENDIZAGEM DE FÍSICA I PARA DISCENTES SURDOS NO INSTITUTO FEDERAL DO AMAZONAS-IFAM/CMC

Data de aceite: 01/03/2021

Carla Caroline Melgueira Silva

Licenciada em Física – IFAM. Campus Manaus Centro.

Allaiza Thaisa Maia Menezes

Licencianda em Física – IFAM. Campus Manaus Centro.

Fabício de Oliveira Farias

Prof. Msc. Fabrício de Oliveira Farias, Docente do Instituto Federal do Amazonas - IFAM. Campus Manaus Centro.

Klinsley Silva Rosas

Licenciando em Física – IFAM. Campus Manaus Centro.

RESUMO: A experiência a ser relatada se deu com duas alunas do Curso Licenciatura em Física, que diante da problemática, cujo foco consiste no ensino de Física para os alunos com surdez do 1º ano do Ensino Médio dos Cursos Integrados em Informática e Química do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas (IFAM), do Campus Manaus Centro (CMC). É importante destacar que os esses estudantes envolvidos nessa pesquisa, frequentavam aulas de reforço da disciplina Física, oferecidas pelo Núcleo de Atendimento à Pessoas com Necessidades Educacionais Específicas (NAPNE), contudo para o desenvolvimento dessas aulas, foram

elaborados os resumos adaptados e os jogos educativos adaptados para auxiliar no processo de Aprendizagem.

PALAVRAS - CHAVE: Ensino de Física; Inclusão; Jogos educativos adaptados.

ABSTRACT: The experience to be reported took place with two students from the Physics Degree Course, who faced the problem, whose focus is on teaching Physics to students with deafness in the 1st year of High School of the Integrated Courses in Informatics and Chemistry at the Federal Institute of Amazonas Education, Science and Technology (IFAM), Campus Manaus Centro (CMC). It is important to highlight that these students involved in this research, attended classes to reinforce the Physical discipline, offered by the Center for Assistance to People with Specific Educational Needs (NAPNE), however for the development of these classes, adapted summaries and educational games were elaborated. adapted to assist in the Learning process.

KEYWORDS: Physics teaching; Inclusion; Adapted educational games.

1 | INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

A experiência a ser relatada se deu com duas alunas do Curso Licenciatura em Física, que diante da problemática, cujo foco consiste no ensino de Física para os alunos com surdez do 1º ano do Ensino Médio dos Cursos Integrados em Informática e Química do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas (IFAM), do Campus

Manaus Centro (CMC). É importante destacar que os esses estudantes envolvidos nessa pesquisa, frequentavam aulas de reforço da disciplina Física, oferecidas pelo Núcleo de Atendimento à Pessoas com Necessidades Educacionais Específicas (NAPNE), contudo para o desenvolvimento dessas aulas, foram elaborados os resumos adaptados e os jogos educativos adaptados para auxiliar no processo de Aprendizagem.

O IFAM ao longo dos seus 110 anos, vem atendendo à demanda de alunos que ingressam na instituição procurando se adequar às novas leis de inclusão para a educação. Para isso, criou o NAPNE pela Portaria nº 180- GDG/ CEFET - AM/2002, espaço que visa promover acessibilidade na instituição com o objetivo de receber estudantes e providenciando a adaptação do currículo, conforme a necessidade de cada um. O referido Núcleo, disponibiliza atualmente para os alunos com necessidades específicas educacionais a acessibilidade arquitetônica, a acessibilidade pedagógica, a acessibilidade comunicacional e a acessibilidade atitudinal, além de disponibilizar tradutores/intérpretes da Língua Brasileira de Sinais (Libras) para acompanhar estes discentes durante as suas aulas.

Um ponto importante é que nem sempre o intérprete dispõe de conhecimentos a respeito dos conceitos e teorias que os professores ensinam em sala de aula, dessa forma, isso acaba sendo um problema, pois estes devem repassar aos alunos o que o professor fala em sala de aula, tornando portanto, a tradução para a Libras de forma equivocada. Além disso, não existem terminologias em Libras para descrever alguns fenômenos e conceitos específicos da Física. Com isso, os intérpretes enfrentam dificuldades com as especificidades, já que nem sempre o conhecimento deles, condiz com o conceito que está sendo trabalhado, de modo que a tradução para Libras pode ocorrer de maneira distorcida (SILVEIRA; SOUSA, 2011).

A Física é uma disciplina que é considerada complexa, até para pessoas ouvintes, sendo esta uma das ciências que lida basicamente com interpretações de fenômenos naturais do cotidiano, esses fenômenos são moldados através da matemática, e para abordar alguns temas, necessitamos da audição para conhecer os sons graves ou agudos, como a Acústica por exemplo.

Não podemos deixar de destacar que existem conceitos da Física que ainda não foram traduzidos para a Libras, devido a este fator torna-se difícil ensinar vários conteúdos da Física I, desta forma o professor ou intérprete que acompanha estes discentes, deve procurar outros recursos didáticos como os jogos educativos adaptados para facilitar a aprendizagem, para ensinar vários conceitos e descrever fórmulas da Física que não são compreendidos de forma satisfatória por estes discentes, visto que a forma de ensino tradicional não contribui para a aprendizagem dos mesmos e também porque estes possuem uma limitação à falta de audição, que embora não interfira no seu aprendizado, mas limita a aquisição de conhecimentos transmitidos oralmente, conforme afirma Zenari (2003) “a falta de audição não afeta as capacidades intelectuais, mas limita a possibilidade

de aquisição de conhecimentos transmitidos oralmente, prejudicando o desenvolvimento do raciocínio abstrato, já que haverá dificuldades em formar conceitos simbólicos, que não necessitem da exploração concreta dos objetos”.

Com base nas considerações e problemas apontados no ensino de Física para discentes surdos, propõe-se utilizar uma metodologia de ensino diferenciada, com o uso dos jogos educativos adaptados, que foram confeccionados durante o projeto, com o objetivo de facilitar a compreensão dos assuntos da Física I, estimular a curiosidade desses discentes surdos e fazer um acompanhamento do rendimento dos mesmos nesse componente curricular. Nosso público-alvo, foram discentes surdos do IFAM-CMC, que durante a execução deste projeto contou com a participação de cinco discentes surdos matriculados no Ensino Médio Integrado sendo: cinco alunos surdos matriculados no primeiro ano, mas em diferentes cursos, três discentes surdos matriculados no curso Integrado em Informática, dois discentes surdos matriculados no curso Integrado em Química.

2 | OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Propor uma metodologia de ensino diferenciada, onde através da utilização de jogos educativos adaptados, possamos melhorar o ensino de Física I para estudantes com surdez do IFAM-CMC.

2.2 Objetivos Específicos

- Com base em um levantamento dos conceitos da Física que não estão contextualizados e que são ensinados de forma muito teórica, a partir desses temas, elaborar jogos educativos para facilitar a aprendizagem dos discentes;
- Desenvolver uma metodologia de ensino diferenciada, associada a utilização de recursos “jogos educativos adaptados” para o ensino de temas da Física I disponibilizando uma linguagem simplificada, imagens, termos em Libras e utilização de palavras-chaves para facilitar a compreensão e aprendizagem dos discentes.

3 | MÉTODO

Primeiramente foi feita uma pesquisa, onde o objetivo era saber quais os assuntos do componente curricular Física 1 que estes discentes mais apresentavam dificuldades. Posteriormente, foram elaborados os resumos adaptados sobre vários temas, tais como cinemática, movimento em uma dimensão, movimento em duas dimensões e as Leis de Newton. Foi levado em consideração que os discentes surdos, compreendem melhor

através do aspecto visual, dessa forma, procurou-se elaborar um material com a menor quantidade de textos possível e maior quantidade de elementos visuais, como por exemplo imagens, diagramas, esquemas e fluxogramas.

Para a confecção dos jogos educativos adaptados para o ensino dos temas de Física, elaboramos resumos de cada conteúdo do bimestre para facilitar a aprendizagem dos discentes surdos, todavia, nesses resumos, foram utilizados muitas imagens, exemplos do cotidiano, detalhamos às fórmulas de cada conteúdo e ao final de cada resumo, propomos um jogo educativo adaptado, contendo a cruzadinha, o caça-palavras ou o jogo da memória de acordo com o assunto abordado no resumo. Logo, considerando o conteúdo que foi trabalhado nas aulas do reforço de Física na sala de atendimento, associado ao uso desses materiais como recursos, nossa ideia é verificar o entendimento dos estudantes nos conceitos estudados e as respectivas contribuições na aprendizagem dos mesmos.

Os exemplos e exercícios que foram utilizados nos resumos adaptados, foram em sua maioria tirados da Apostila de Física Anchieta, visto que a mesma apresenta uma linguagem simplificada e possui várias imagens. Agora, em relação aos assuntos que não eram explicados com uma abordagem visual através dessa apostila, procurou-se pesquisar em outras fontes, como livros didáticos e livros digitais. Para confecção deste material didático em forma de resumo, utilizamos além das imagens, fluxogramas, que facilitavam a compreensão do aluno e permitia a visualização do passo-a-passo da solução de um exemplo ou exercício resolvido. Também utilizamos, as palavras-chaves, que foram usadas como palavras principais, fazendo, portanto, a associação com o conteúdo abordado.

Mesmo se considerarmos um aluno comum, este necessita de apoio e acompanhamento em suas atividades, pois surgem dúvidas no processo de aprendizagem, o que é perfeitamente normal. Em virtude disso, oferecemos apoio aos alunos surdos, atendidos pelo projeto para esclarecer os conteúdos e sanar possíveis dúvidas referentes aos resumos adaptados e aos jogos educativos adaptados.

Com base no acompanhamento dos discentes surdos, através das aulas de reforço de Física, percebemos a importância de elaborar recursos didáticos adaptados para esse público. Para SOUZA (2007, p.111), “Recurso didático é todo material utilizado como auxílio no ensino-aprendizagem do conteúdo proposto para ser aplicado, pelo professor, diante de seus alunos”.

Atualmente existe uma variedade de recursos didáticos que são utilizados para trabalhar com discentes surdos do Ensino Fundamental, porém existem poucos recursos didáticos para se trabalhar com este público no Ensino Médio, público que possui uma forma diferente de aprender.

De posse dessas informações sobre as particularidades dos discentes foram elaborados e confeccionados os jogos educativos adaptados sobre os assuntos de Física 1, como as cruzadinhas, o jogo de caça-palavras e o jogo da memória, sobre temas da Física contextualizados com as situações cotidianas destes discentes surdos. É importante

destacar que os jogos educativos adaptados foram elaborados e confeccionados de acordo com os assuntos do componente curricular Física I, que tinham sido abordados nas aulas de reforço, usando a sala de atendimento, que é o local onde são ministradas as aulas desse reforço. De acordo com o desempenho dos discentes nas atividades e nos jogos educativos adaptados, observou-se que através da inserção desse recurso didático, houve uma evolução na aprendizagem desses discentes, pois os mesmos já tinham estudado sobre os assuntos da Física I que envolviam os jogos durante as aulas de reforço e sala de aula regular, além de ter aumentado a interação com os colegas surdos, ainda estimulou o espírito de competição durante os jogos entre os mesmos.

4 | RESULTADO E DISCUSSÃO

Produzir um recurso didático para o ensino de discentes com surdez não é uma tarefa fácil, pois requer muito esforço, trabalho e dedicação por partes dos envolvidos. Se tal material for direcionado para um público específico, a tarefa é ainda maior, carecendo de um estudo aprofundado sobre o objeto.

Para a produção dos materiais didáticos de Física para alunos surdos, tivemos que seguir alguns passos no desenvolvimento das atividades, que foram necessárias para o andamento do trabalho.

Passo 1: Pesquisa sobre os materiais didáticos produzidos sobre o Ensino de Física para discentes surdos

Inicialmente, foi necessário realizar pesquisas sobre os materiais que tinham sido produzidos na mesma linha de pesquisa do projeto, porém ressaltamos que poucos materiais foram encontrados, mas, no entanto, alguns artigos sobre trabalhos com alunos deficientes auditivos serviram como embasamento teórico, de como proceder nas atividades.

Lembramos que o trabalho de pesquisa sobre os temas que seriam trabalhados nesse projeto, foram realizados no primeiro mês. Também nesse período, foi feito o acompanhamento dos discentes surdos nas aulas de reforço de Física, com o objetivo de identificar problemas relacionados à forma convencional de ensino e as principais dificuldades dos discentes surdos atendidos pelo projeto, conforme é mostrado na tabela (1) abaixo:

Alunos	Curso / ano
Aluno A	INF / 1º ano
Aluno B	INF / 1º ano
Aluno C	INF / 1º ano
Aluna D	QUI / 1º ano
Aluna E	QUI / 1º ano

Tabela 1: Discentes participantes do projeto

Fonte: Acervo pessoal

Passo 2: Elaboração dos Resumos Adaptados sobre temas da Física

Para dar início a elaboração dos resumos adaptados que antecederiam aos jogos educativos adaptados, foi feita uma pesquisa para encontrar um livro didático ou apostila que tivesse uma linguagem simplificada, que pudesse auxiliar na elaboração destes resumos adaptados. Utilizamos então, a apostila construindo a Física material pertencente ao colégio Anchieta, onde é importante destacar que esse material apresenta uma linguagem simples e possui várias imagens, desta forma facilitou o nosso trabalho.

Posteriormente, foram elaborados os resumos adaptados sobre vários temas da Física I como cinemática, movimento em uma dimensão, movimento em duas dimensões e as Leis de Newton. Os discentes surdos entendem mais através do aspecto visual, levando isso em consideração, procurou-se elaborar um material com a menor quantidade de textos possível e maior quantidade de elementos visuais, que neste caso foram: imagens, diagramas, esquemas e fluxogramas.

Cada assunto que foi trabalhado em nossos resumos adaptados, foi feito uma explicação detalhada do conteúdo abordado, assim descrevemos as variáveis envolvidas em cada fórmula e ainda utilizamos imagens nos exemplos resolvidos, para facilitar a compreensão e a abstração do conteúdo, conforme mostramos através da figura 1.

Cinemática

É o campo da Física que estuda o movimento com corpos desconsiderando suas causas.

❖ Ponto material e corpo extenso

Quando se estuda o movimento de um corpo é necessário saber o comprimento, largura e a altura. Pois acontecem casos em que as dimensões do corpo são bastante pequenas em relação às outras medidas envolvidas, com isso elas podem ser desprezadas e, portanto o corpo é considerado um “ponto material” conforme o exemplo apresentado na figura 1.



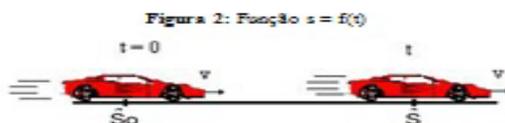
Fonte: <https://www.coladaweb.com/fisica/mecanica/inercia>

Figura 1: Abordagem teórica de um tópico da Física com a associação de imagens

Fonte: <http://coladaweb.com/fisica/mecanica/inercia>

Foram inseridos elementos que representavam as variáveis nas fórmulas de cada assunto abordado, também foi feita uma contextualização dos exemplos e exercícios resolvidos com imagens, para que não precisasse de muitas informações textuais para explicar os assuntos da Física. Cada conteúdo que trabalhamos em nossos resumos adaptados, buscamos explicar sempre inserindo variáveis relacionadas com as fórmulas da Física, conforme é mostrado na figura 2.

Podemos ver a função horária da função $s = f(t)$ para o MRU.



Fonte: Apostila de física 9 ano - Anchieta

- O carro parte na posição S_0 no instante $t = 0$
- No seguinte momento o carro encontra-se na posição final S

Assim partimos da definição de velocidade média, que é:

$$v_m = \frac{s_2 - s_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta s}{\Delta t} \left(\frac{m}{s} \right)$$

Depois aplicamos as definições acima:

$$v = \frac{s - s_0}{t - 0}$$

Simplificando a expressão

$$v = \frac{s - s_0}{t - 0} \Rightarrow v \cdot t = s - s_0 \Rightarrow s_0 + v \cdot t = s$$

Isolando a posição final na fórmula:

$$s_0 + v \cdot t = s$$

Assim encontramos a função horária do MRU



Figura 2: Contextualização do tema MRU e detalhamento das variáveis envolvidas

Fonte: Acervo pessoal

Dessa maneira, procuramos apresentar uma visão mais generalizada do conteúdo, só que de maneira simplificada, através da visualização daquilo que foi envolvido como variável nos exemplos e exercícios resolvidos, fornecendo as informações necessárias para a compreensão do assunto abordado por parte desses discentes surdos.

Passo 3: Pesquisa e elaboração dos Jogos Educativos Adaptados

O último passo foi o mais difícil de ser executado, devido à dificuldade de se encontrar jogos adaptados sobre temas da Física, encontrou-se vários jogos adaptados para surdos, porém todos os jogos que foram encontrados eram voltados para o ensino fundamental ou primário, além não encontrarmos muitos sinais em Libras relacionados aos termos da Física. No entanto, após realizarmos diversas pesquisas feitas na internet, de artigos, monografias, livros digitais, apostilas, bem como o próprio acervo do NAPNE, conseguimos um excelente material que nos auxiliou neste trabalho. O material intitulado

“Sinalizando a Física” foi a nossa fonte principal dos sinais em Libras, pois ele abrange quase todos os termos que são ministrados no 1º ano do Ensino Médio.

Com o auxílio deste material e da apostila construindo a Física, elaboramos vários jogos educativos adaptados para este público como a cruzadinha, o caça-palavras e o jogo da memória sobre temas da Física contextualizados com as situações cotidianas destes discentes surdos, conforme mostramos nas figuras 3 e 4.

Cruzadinha sobre a Cinemática	
1.	Cinemática é o estudo do movimento dos _____ ? (dica: a resposta tem 6 letras).
2.	O Δx representa a variação de _____ ? (dica: a resposta tem 6 letras).
3.	Considere dois observadores A e B em que, o observador A encontra-se dentro de um ônibus que se movimenta numa estrada e o observador B, na beira da estrada. Ambos observam uma lâmpada no teto do ônibus, para o observador B a lâmpada esta em movimento e para o observador A, esta em _____ ? (dica: a resposta tem 7 letras).
4.	Supondo que uma formiga esteja atravessando uma rua, neste caso, ela é considerada um ponto material ou um corpo extenso? (dica: a resposta tem 13 letras).
5.	Uma baleia de 5 metros se desloca em uma piscina de 12 metros, o referencial dela é de ponto material ou um corpo extenso? (dica: a resposta tem 12 letras).
6.	Qual a órbita que a Terra se encontra como um ponto material? (dica: a resposta tem 11 letras).
7.	Um aluno está indo para a aula de carro, em certo momento o carro faz uma parada inesperada, o que acontece com o corpo do garoto? (dica: a resposta tem 9 letras).
8.	Um jogador da seleção brasileira está cobrando um pênalti e um fã da arquibancada da lateral observa a trajetória da bola saindo do chão e chegando a trave, qual tipo de trajetória a bola fez? (dica: a resposta tem 9 letras).

Figura 3: Jogo a Cruzadinha sobre a Cinemática com as dicas das respostas.

Fonte: Acervo pessoal

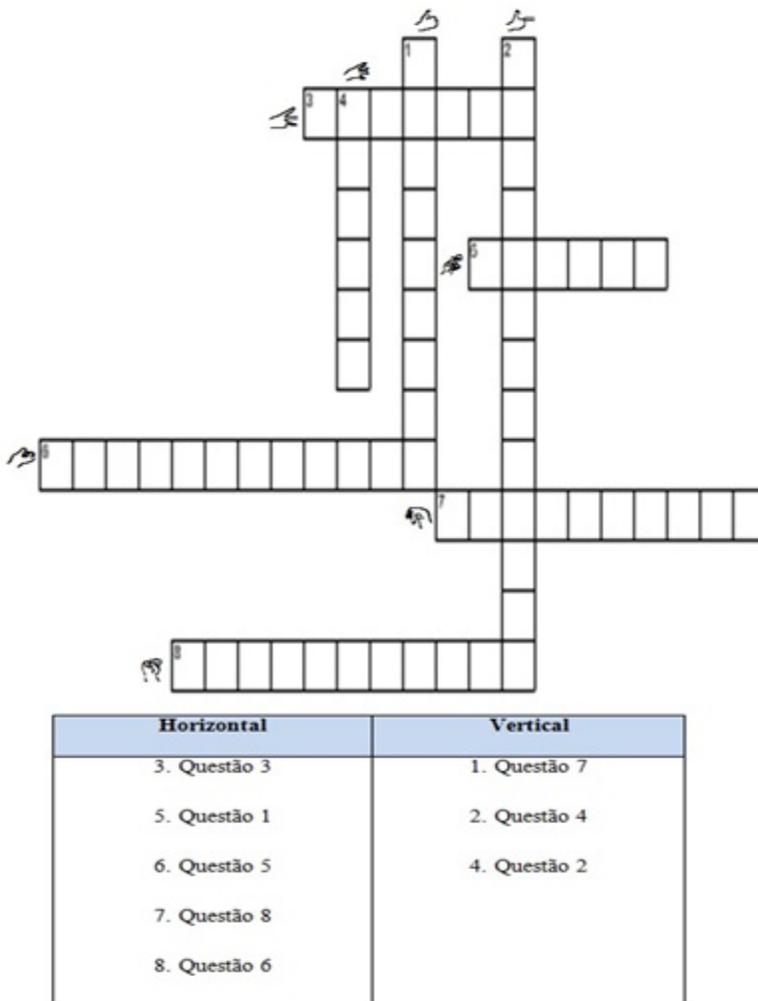


Figura 4: Jogo sobre a Cinemática com Libras

Fonte: Acervo pessoal

Outro jogo educativo adaptado que foi confeccionado com temas da Física foi o jogo caça-palavras, que tinha o objetivo de verificar se os discentes tinham assimilado o conteúdo que foi trabalhado anteriormente na sala de aula, conforme é mostrado na figura 5.

Caça-palavras sobre as considerações conceituais das Leis de Newton

As Leis de Newton é a parte da física que aborda o estudo das **forças** que atuam sobre um **objeto** produzindo ou alterando o seu **movimento** ou mesmo o deformando-o. As Leis de Newton também são conhecidas como os **três** princípios da **dinâmica** que agem na natureza dos corpos, elas são divididas em três leis, mais conhecidas como as Leis de **Newton**, são elas: Princípio da **inércia** ou **primeira** lei de Newton; Princípio Fundamental da Dinâmica ou **segunda** lei de Newton; Princípio da ação e reação ou **terceira** lei de Newton.

De acordo com o texto sobre as Leis de Newton encontre as palavras em **negrito** no caça-palavras abaixo:

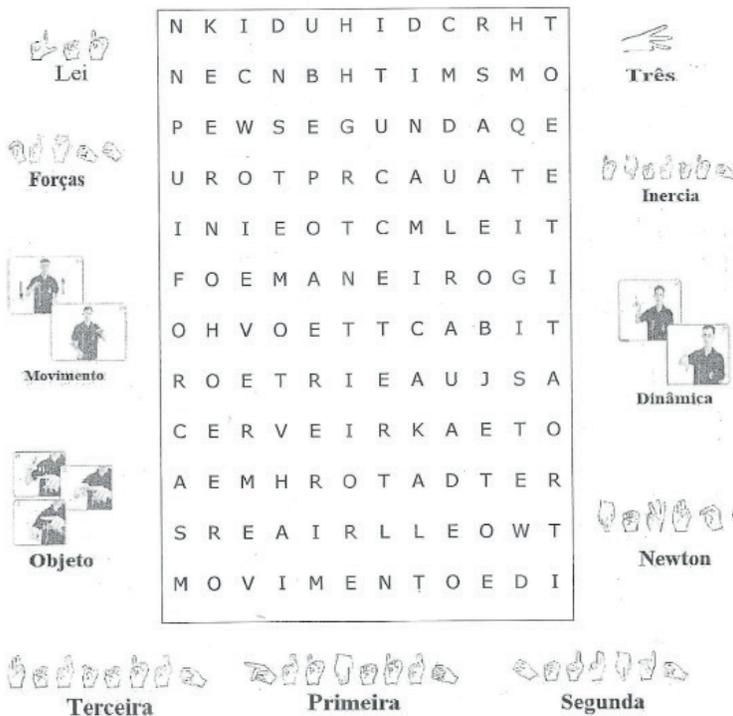


Figura 5: Exemplo do jogo caça-palavras

Fonte: Acervo pessoal

Estes jogos educativos adaptados foram propostos após ter sido feita a explanação de cada assunto da Física, para que desta forma os discentes surdos não tivessem dificuldade e pudessem ter mais autonomia, de acordo com o representado na figura 6.



Figura 6: Discentes surdos realizando a atividade do caça-palavras, cujo tema era Leis de Newton

Fonte: Acervo pessoal

Outro jogo educativo adaptado confeccionado durante o desenvolvimento deste projeto, foi justamente o jogo da memória que envolveu dois temas da Física como a cinemática e as leis de Newton. Devemos destacar que neste jogo, foi possível fazer uma associação de uma imagem que represente o fenômeno da Física com um sinal em Libras do termo da Física ou em datilologia, onde é feita a sinalização do alfabeto manual da palavra, conforme mostramos na figura 7.



Figura 7: Jogo da memória com exemplos de associação de imagens com o sinal de um termo da Física em Libras ou em datilografia

Fonte: Acervo pessoal

Portanto, os resumos adaptados e os jogos educativos também adaptados que foram produzidos, foram disponibilizados no segundo semestre na sala de atendimento aos alunos surdos do 1º ano do Ensino Médio no IFAM-CMC, para que estes possam servir de material didático de apoio no componente curricular Física e possam ser utilizados por outros professores que atendem estes discentes surdos ou outros que adentrarão na instituição com o intuito de facilitar a aprendizagem dos mesmos.

Outra questão a ser considerada é que estes materiais adaptados, também servirão de apoio para os professores de Física, que forem ensinar para alunos surdos em suas turmas e que muitas vezes não sabem como ensinar para este público específico. Assim, este estudante poderá mostrar através dos resumos adaptados e dos jogos, onde está a sua dúvida, portanto o aluno poderá pedir explicação do assunto ou na parte onde não está entendendo e assim o professor poderá observar como o aluno surdo aprende e poderão servir também de modelo caso o professor queira adaptar outro assunto da Física que não foi contemplado por este projeto.

Passo 4: Acompanhamento das atividades dos discentes surdos nas aulas de reforço de Física

Durante a execução deste projeto foi feito o acompanhamento dos discentes surdos na sala de atendimento ao longo de várias aulas de reforço de Física. A sala de atendimento é um espaço reservado para realizar as aulas de reforços de várias disciplinas como Matemática, Física, Química, Informática, Língua Portuguesa, além da Libras e desenvolver atividades extracurriculares com os discentes surdos.

Foram desenvolvidas várias atividades durante o acompanhamento desses discentes surdos, como apoio nas aulas de aulas de reforço sobre temas da Física, auxílio na solução de problemas de Física, acompanhamento durante a solução das atividades de Física, inclusive durante a aplicação dos jogos educativos adaptados, onde auxiliávamos, tiramos as dúvidas dos discentes de acordo com a figura 8.



Figura 8: Interação dos discentes nas aulas de reforço.

Fonte: Acervo pessoal

No decorrer das atividades desenvolvidas por este projeto, percebeu-se a importância de se confeccionar materiais adaptados para este público específico, que possui uma forma diferente de aprender.

5 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

O projeto em questão não tem a intenção de fornecer todas as soluções para os problemas que rondam a aprendizagem de alunos surdos no Ensino Médio. No entanto, iniciativas como esta, aliadas à vontade e ao interesse dos envolvidos, são o que contribui para o progresso da educação inclusiva no Brasil e no mundo. Ainda há muito o se que

fazer com relação à criação de novos recursos, à capacitação de profissionais e à garantia de acesso à educação para as minorias (FERRAZ, 2014). Apesar das dificuldades para encontrar os materiais adaptados que servissem de modelo para nos basear, o trabalho teve um ótimo resultado, pois a produção dos resumos adaptados e dos jogos educativos, auxiliou muito no processo de ensino-aprendizagem desses discentes surdos que participaram das atividades do projeto.

Através dessa iniciativa, percebemos a importância de se confeccionar materiais adaptados que possam atender a esse público e que ações como essa devem ser mais incentivadas, pois, não se pode deixar esse público a margem do conhecimento, pois eles têm os mesmos direitos ao conhecimento que os demais, entretanto, não podemos “fechar os olhos” para a situação que está à frente de nossos olhos, pois sabemos que este público necessita de uma atenção especial, e que nem sempre é dada, e recursos como os que foram confeccionados serão em um futuro não muito distante de fundamental importância para auxiliar no processo de ensino-aprendizagem dos alunos surdos, que estão adentrando cada vez mais nas escolas regulares ao longo dos anos.

Com o apoio do NAPNE, que nos concedeu a oportunidade de acompanhar os discentes surdos na sala de atendimento, pudemos compreender como estes discentes surdos aprendem e desta forma pudemos criar um material que realmente pudesse atender o público em questão, e buscamos produzir com todos os detalhes ao qual deve ser levado em consideração, como o fato de que eles entendem mais através do aspecto visual, levando isso em consideração procuramos trabalhar com a menor quantidade de textos possível e maior quantidade de elementos visuais, que neste caso foram: imagens, tabelas, diagramas, esquemas, fluxogramas. Desta forma estes materiais produzidos no decorrer deste projeto, como os resumos adaptados e os jogos educativos inclusivos realmente contribuíram para a compreensão dos assuntos por parte dos discentes surdos na disciplina Física e isso contribuiu para aumentar o rendimento deles na matéria Física.

REFERÊNCIAS

BELTRAMIN, S. Franciane; GÓIS, Jackson; **Materiais Didáticos para Alunos Cegos e Surdos no Ensino de Química**. In: Encontro Nacional de Ensino de Química (ENEQ), 12, Brasília, 2012.

NOGUEIRA, S. L.; REIS, R. L.; RICARDO, C. E.; **Ensino de Física para Portadores de Deficiência Auditiva: o Problema dos Livros Didáticos**; Disponível em: <http://www.cienciamao.usp.br/tudo/exibir.php?midia=snef&cod=_ensinodefisicaparaportad_1> 25 jun. 2020.

SILVA, S. A. M. et al; **Utilização de Recursos Didáticos no processo de ensino e aprendizagem de Ciências Naturais em turmas de 8º e 9º anos de uma Escola Pública de Teresina no Piauí**; Disponível em: <<http://propi.iftto.edu.br/ocs/index.php/connepi/vii/paper/viewFile/3849/2734>>. Acesso em: 27 jun. 2020.

FERRAZ, T. A. S.; **RECURSOS DIDÁTICOS PARA A INCLUSÃO DE ALUNOS SURDOS**. Disponível em: <<http://www.cap.uerj.br/site/images/stories/noticias/9-ferraz.pdf>>. Acesso em: 27 jun. 2020.

SILVA, C. C. M.; LAVOR, P. L.; FARIAS, F. O.; **O Desenvolvimento de Jogos Educativos Adaptados Como Recurso Didático no Processo de Ensino-Aprendizagem Para Alunos Surdos e Ouvinte no Estudo das Leis de Newton**. Trabalho de Conclusão de Curso de Licenciatura Física – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas, Campus Manaus Centro, 2018.

ALMEIDA, Lucia Cruz. **Física e Surdez: Estratégias e Recursos Didáticos para o Ensino da primeira Lei de Newton**. Ensino, Saúde e Ambiente, v. 7, n. 1, 2014.

FONTES, da S. Adriana e et al; **Jogos Adaptados para o Ensino de Física**. Ensino, Saúde e Ambiente – V9 (3), pp. 226-248, Dez. 2016.

ABREU, DE A. JONATHAS. **Ensino de Física e Surdez Construindo Conceitos e Criando Sinais**. Disponível em: <http://app.uff.br>. Acesso em: 10 out. 2019.

CARDOSO, C. F.; BOTAN, E.; FERREIRA, R. M.; **Sinalizando a Física**. Volume 1 Vocabulário de Mecânica. 1º Edição- Sinop: Projeto “Sinalizando a Física”, 2010.

MELO W.; **Física 9º ano Construindo o Conhecimento**; Disponível em: <<http://www.colegioanchieta.com.br/recife/apostilas/2016/apostila-de-fisica.pdf>>. Acesso em: 14 set. 2018.

XAVIER, Claudio; BENIGNO, Barreto; **Coleção Física Aula por Aula**; Física; Ensino Médio; Volume 1; 1ª Edição; São Paulo-2010.

SOBRE O ORGANIZADOR

EDSON RIBEIRO DE BRITTO DE ALMEIDA JUNIOR - Licenciado em Física pela Universidade Estadual de Maringá (UEM). Mestre em Educação para a Ciência e a Matemática, pelo programa stricto sensu de Pós-Graduação em Educação para a Ciência e a Matemática (PCM UEM). Doutorando em Educação para a Ciência e a Matemática pelo programa stricto sensu de Pós-Graduação em Educação para a Ciência e a Matemática (PCM UEM). Atualmente é professor de Física, Matemática e Robótica na rede básica de ensino. Coordenador Pedagógico do Centro Educacional Freitas Cavalcanti - Colégio Conexão COC. Professor de Matemática, Bioestatística, Métodos Quantitativos, Inovação Tecnológica e Projeto Unificado na Faculdade União de Campo Mourão. Tem experiência na área de Educação, Matemática e Física, atuando principalmente nos seguintes temas: Ensino de Física, Robótica Educacional, Educação em Astronomia, Jogos Digitais Pedagógicos, Inovação Tecnológica e Representações Sociais. Contato: erbaj13@gmail.com.

ÍNDICE REMISSIVO

A

Aplicações Físicas 8, 79

Aprendizagem de física 8, 100

B

Brinquedos 8, 79, 80, 86

D

Dinâmica Molecular 5, 7, 23, 26, 31, 39

Discentes surdos 102, 103, 104, 105, 107, 108, 110, 111, 112, 113, 114

E

Eletromagnetismo 8, 72, 74, 78

Elétron-Buraco 5, 7, 1, 8, 10

Ensino de Física 6, 11, 71, 78, 79, 99, 100, 104, 114, 115, 116

Ensino Tradicional 101

F

Física I 6, 8, 71, 100, 101, 102, 104, 105

G

Giroscópios 8, 79

I

Inclusão 6, 95, 100, 101, 115

Instituto Federal do Amazonas 8, 100

Interfaces ternárias 28, 35, 38

International Space Station 45, 46, 49, 53, 56, 57

J

Jogos educativos 6, 8, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 107, 108, 110, 112, 113, 114, 115

M

Modelagem Científica 5, 7, 58, 59, 60, 61, 70, 71

Modelo Teórico 5, 7, 58, 59, 60, 61, 64, 65, 68, 69, 70, 71

Molas associadas em série 61, 63, 64

Molhabilidade 7, 23

P

Piões 8, 79, 81

Poço Quântico 5, 7, 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 10

Precipitável 5, 7, 12, 13, 21

Proposta Experimental 8, 72

R

Resistência do ar 8, 88, 95

S

Simulação Numérica 7, 1

space debris 44, 45, 46, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56

Space debris 7, 44, 52

Spinners 8, 79

Surdos 6, 8, 100, 102, 103, 104, 105, 107, 108, 110, 111, 112, 113, 114, 115

T

Termômetro Infravermelho 14, 15, 16, 17, 20

Trebuchet 6, 8, 88, 89, 90, 91, 92, 94, 99

Trem Magnético 5, 8, 72, 74, 75, 76, 77, 78

Física:

Universo e os Fenômenos Naturais

www.atenaeditora.com.br

contato@atenaeditora.com.br

@atenaeditora

www.facebook.com/atenaeditora.com.br



Ano 2021

Física:

Universo e os Fenômenos Naturais

www.atenaeditora.com.br

contato@atenaeditora.com.br

@atenaeditora

www.facebook.com/atenaeditora.com.br



Ano 2021