

Física:

Universo e os Fenômenos Naturais

2

Sabrina Passoni Maravieski
(Organizadora)

Atena
Editora

Ano 2021

Física:

Universo e os Fenômenos Naturais

2

Sabrina Passoni Maravieski
(Organizadora)

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
Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa
Prof. Dr. Daniel Richard Sant’Ana – Universidade de Brasília
Prof. Dr. Deyvison de Lima Oliveira – Universidade Federal de Rondônia
Profª Drª 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
Profª Drª Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionale 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
Profª Drª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins
Prof. Dr. Luis Ricardo Fernandes da Costa – Universidade Estadual de Montes Claros
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Marcelo Pereira da Silva – Pontifícia Universidade Católica de Campinas
Profª Drª Maria Luzia da Silva Santana – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Pablo Ricardo de Lima Falcão – Universidade de Pernambuco
Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Rita de Cássia da Silva Oliveira – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Prof. Dr. Rui Maia Diamantino – Universidade Salvador
Prof. Dr. Saulo Cerqueira de Aguiar Soares – Universidade Federal do Piauí
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande
Profª Drª Vanessa Ribeiro Simon Cavalcanti – Universidade Católica do Salvador
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. Dr. Arinaldo Pereira da Silva – Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará
Prof. Dr. Antonio Pasqualetto – Pontifícia Universidade Católica de Goiás
Profª Drª Carla Cristina Bauermann Brasil – Universidade Federal de Santa Maria
Prof. Dr. Cleberton Correia Santos – Universidade Federal da Grande Dourados
Profª Drª 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
Profª Drª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Prof. Dr. Jael Soares Batista – Universidade Federal Rural do Semi-Árido
Prof. Dr. Jayme Augusto Peres – Universidade Estadual do Centro-Oeste
Prof. Dr. Júlio César Ribeiro – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Profª Drª Lina Raquel Santos Araújo – Universidade Estadual do Ceará
Prof. Dr. Pedro Manuel Villa – Universidade Federal de Viçosa
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará
Profª Drª 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 Alfenas

Ciências Biológicas e da Saúde

Prof. Dr. André Ribeiro da Silva – Universidade de Brasília
Profª Drª Anelise Levay Murari – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Benedito Rodrigues da Silva Neto – Universidade Federal de Goiás
Profª Drª Daniela Reis Joaquim de Freitas – Universidade Federal do Piauí
Profª Drª 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
Profª Drª Elizabeth Cordeiro Fernandes – Faculdade Integrada Medicina
Profª Drª Eleuza Rodrigues Machado – Faculdade Anhanguera de Brasília
Profª Drª Elane Schwinden Prudêncio – Universidade Federal de Santa Catarina
Profª Drª Eysler Gonçalves Maia Brasil – Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira
Prof. Dr. Ferlando Lima Santos – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Profª Drª Fernanda Miguel de Andrade – Universidade Federal de Pernambuco
Prof. Dr. Fernando Mendes – Instituto Politécnico de Coimbra – Escola Superior de Saúde de Coimbra
Profª Drª 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
Profª Drª 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
Profª Drª Magnólia de Araújo Campos – Universidade Federal de Campina Grande
Prof. Dr. Marcus Fernando da Silva Praxedes – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Profª Drª Maria Tatiane Gonçalves Sá – Universidade do Estado do Pará
Profª Drª Mylena Andréa Oliveira Torres – Universidade Ceuma
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federacl 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
Profª Drª Regiane Luz Carvalho – Centro Universitário das Faculdades Associadas de Ensino
Profª Drª Renata Mendes de Freitas – Universidade Federal de Juiz de Fora
Profª Drª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande
Profª Drª Welma Emidio da Silva – Universidade Federal Rural de Pernambuco

Ciências Exatas e da Terra e Engenharias

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto
Profª Drª Ana Grasielle Dionísio Corrêa – Universidade Presbiteriana Mackenzie
Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás
Profª Drª Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná
Prof. Dr. Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Prof. Dr. Douglas Gonçalves da Silva – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Profª Drª Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará
Profª Dra. Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho
Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande

Profª Drª Luciana do Nascimento Mendes – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Marcelo Marques – Universidade Estadual de Maringá
Prof. Dr. Marco Aurélio Kistemann Junior – Universidade Federal de Juiz de Fora
Profª Drª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Profª Drª Priscila Tessmer Scaglioni – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Sidney Gonçalves de Lima – Universidade Federal do Piauí
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

Linguística, Letras e Artes

Profª Drª Adriana Demite Stephani – Universidade Federal do Tocantins
Profª Drª Angeli Rose do Nascimento – Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro
Profª Drª Carolina Fernandes da Silva Mandaji – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Profª Drª Denise Rocha – Universidade Federal do Ceará
Profª Drª Edna Alencar da Silva Rivera – Instituto Federal de São Paulo
Profª Drª Fernanda Tonelli – Instituto Federal de São Paulo,
Prof. Dr. Fabiano Tadeu Grazioli – Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná
Profª Drª Keyla Christina Almeida Portela – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Paraná
Profª Drª Miraniide Oliveira Neves – Instituto de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará
Profª Drª Sandra Regina Gardacho Pietrobon – Universidade Estadual do Centro-Oeste
Profª Drª 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
Profª Ma. Adriana Regina Vettorazzi Schmitt – Instituto Federal de Santa Catarina
Prof. Dr. Alex Luis dos Santos – Universidade Federal de Minas Gerais
Prof. Me. Alexsandro Teixeira Ribeiro – Centro Universitário Internacional
Profª Ma. Aline Ferreira Antunes – Universidade Federal de Goiás
Profª Drª Amanda Vasconcelos Guimarães – Universidade Federal de Lavras
Prof. Me. André Flávio Gonçalves Silva – Universidade Federal do Maranhão
Profª Ma. Andréa Cristina Marques de Araújo – Universidade Fernando Pessoa
Profª Drª Andrezza Lopes – Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento Acadêmico
Profª Drª Andrezza Miguel da Silva – Faculdade da Amazônia
Profª Ma. Anelisa Mota Gregoleti – Universidade Estadual de Maringá
Profª 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
Profª 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. Carlos Augusto Zilli – Instituto Federal de Santa Catarina
Prof. Me. Christopher Smith Bignardi Neves – Universidade Federal do Paraná
Profª Drª 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. Edson Ribeiro de Britto de Almeida Junior – Universidade Estadual de Maringá
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
Prof. Me. Francisco Sérgio Lopes Vasconcelos Filho – Universidade Federal do Cariri
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/UFGA
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 Fenomenología & Subjetividade/UFPR
Prof. Me. Leonardo Tullio – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Ma. Lilian Coelho de Freitas – Instituto Federal do Pará
Profª Ma. Lilian de Souza – Faculdade de Tecnologia de Itu
Profª Ma. Liliani Aparecida Sereno Fontes de Medeiros – Consórcio CEDERJ
Profª Drª Lúvia 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
Profª Ma. Luana Ferreira dos Santos – Universidade Estadual de Santa Cruz
Profª Ma. Luana Vieira Toledo – Universidade Federal de Viçosa
Prof. Me. Luis Henrique Almeida Castro – Universidade Federal da Grande Dourados
Prof. Me. Luiz Renato da Silva Rocha – Faculdade de Música do Espírito Santo
Profª 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
Profª Ma. Maria Elanny Damasceno Silva – Universidade Federal do Ceará
Profª Ma. Marileila Marques Toledo – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri
Prof. Dr. Pedro Henrique Abreu Moura – Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais
Prof. Me. Pedro Panhoca da Silva – Universidade Presbiteriana Mackenzie
Profª Drª Poliana Arruda Fajardo – Universidade Federal de São Carlos
Prof. Me. Rafael Cunha Ferro – Universidade Anhembi Morumbi
Prof. Me. Ricardo Sérgio da Silva – Universidade Federal de Pernambuco
Prof. Me. Renan Monteiro do Nascimento – Universidade de Brasília
Prof. Me. Renato Faria da Gama – Instituto Gama – Medicina Personalizada e Integrativa
Profª 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
Profª Ma. Silene Ribeiro Miranda Barbosa – Consultoria Brasileira de Ensino, Pesquisa e Extensão
Profª Ma. Solange Aparecida de Souza Monteiro – Instituto Federal de São Paulo
Profª Ma. Taiane Aparecida Ribeiro Nepomoceno – Universidade Estadual do Oeste do Paraná
Prof. Me. Tallys Newton Fernandes de Matos – Faculdade Regional Jaguaribana
Profª 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 2

Bibliotecária: Janaina Ramos
Diagramação: Luiza Alves Batista
Correção: Mariane Aparecida Freitas
Edição de Arte: Luiza Alves Batista
Revisão: Os Autores
Organizadora: Sabrina Passoni Maravieski

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

F537 Física: o universo e os fenômenos naturais 2 / Organizadora Sabrina Passoni Maravieski. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2021.

Formato: PDF
Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader
Modo de acesso: World Wide Web
Inclui bibliografia
ISBN 978-65-5983-118-0
DOI 10.22533/at.ed.180212805

1. Física. I. Maravieski, Sabrina Passoni (Organizadora).
II. Título.

CDD 530

Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166

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

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 obra “Física: O Universo e os Fenômenos Naturais 2” pertence a uma série de livros publicados pela Editora Atena, e neste 2º volume, composto de 6 capítulos, apresenta alguns estudos realizados sobre a prática do docente no ensino-aprendizagem da disciplina de Física desde o Ensino Fundamental até a formação docentes.

Com a introdução dos PCNEM – Parâmetros Curriculares Nacionais do Ensino Médio em 1999, a presença do conhecimento da Física ganhou um novo sentido e tem como objetivo formar um cidadão contemporâneo e atuante na sociedade, pois a Física, lhe proporciona conhecimento para compreender, intervir e participar da realidade; independente de sua formação posterior ao Ensino Médio.

Por outro lado, na formação de docentes as práticas discursivas do Ensino de Física podem trazer uma ressignificação ao ato de transpor o conhecimento, de forma socialmente transformadora, em prol de uma educação autoemancipadora em todas as dimensões sociais da vida.

A Física estuda os fenômenos naturais e suas mais diversificadas manifestações na natureza, e nesta obra são apresentados algumas ações e reflexões acerca da compreensão humana nesta área em específico, pois a maneira de se abordar um conteúdo da grade curricular pode ser abordado de diversas maneiras.

Alguns conteúdos da grade curricular da disciplina de física são mais complexos de serem inseridos no ensino-aprendizagem desta, pois acredita-se que ainda hoje, o nosso pensamento seja do tipo Aristotélico na compreensão dos fenômenos. Para o rompimento desta forma de pensar, novos conceitos como relatividade, caos, não linearidade dos fenômenos, devem ser introduzidos, mas de uma forma que contribua a sua efetiva compreensão.

Nos últimos anos, a inserção das tecnologias no Ensino de Física proporcionou inúmeras possibilidades de inovação e melhoria no ensino-aprendizagem desta disciplina, tanto no Ensino Médio, como no Ensino Superior. O computador se tornou um recurso muito útil e os softwares são ferramentas que oferecem um leque de aplicações para o Ensino de Física.

Desta forma, algumas pesquisas aqui apresentadas, procuram investigar ou orientar os docentes e os futuros docentes dos Cursos de Licenciatura em Física e Ciências Naturais.

Quando alusivo ao âmbito ensino-aprendizagem, devemos de imediato, pensar nas diversas teorias metodológicas e nos diversos recursos didáticos que podemos adotar em sala de aula, incluindo as atuais tecnologias. Neste sentido, esta obra, tem como objetivo principal oferecer contribuições na formação continuada, bem como, na autoanálise da prática docente, resultando assim, em uma aprendizagem significativa dos estudantes de

Ensino Médio. Neste sentido, o docente poderá implementá-las, valorizando ainda mais a sua prática em sala de aula.

Além disso, a obra se destaca como uma fonte de pesquisa diversificada para pesquisadores em Ensino de Física, visto que, quando mais disseminamos o conhecimento científico de uma área, mais esta área se desenvolve e capacita-se a ser aprimorada e efetivada.

Dentro desta perspectiva, no capítulo 1 desta obra, apresentamos um trabalho sobre o estudo do movimento de um corpo sob a ação da gravidade e da resistência do ar, utilizando a captura em vídeo desses movimentos. As imagens foram analisadas através do *software Tracker*, um software de livre acesso e disponível na rede. A pesquisa conclui que tal recurso tecnológico possui grande potencial pedagógico de vídeos como educacional e a função das tecnologias no auxílio tanto na pesquisa quanto no processo de ensino aprendizagem.

O capítulo 2, são apresentados os conceitos básicos relacionados à dinâmica não-linear e caos por meio de uma revisão histórica do estudo do caos seguida de uma discussão do sistema da Roda d'água caótica. Aborda-se a montagem experimental desse sistema juntamente com o modelo teórico que explica a física envolvida, bem como, o uso de uma simples simulação que ajuda na compreensão do tópico central discutido. Por último, os autores, destacam a importância da não linearidade em várias áreas do conhecimento.

No capítulo 3, os autores propõem a construção de uma sequência didática investigativa, que permita o ensino da Gravidade através de atividades cujo tema integrador são os buracos negros. Na sequência didática investigativa são abordados: o modelo planetário, órbitas dos satélites, velocidade de escape, cama elástica, buracos negros, raio de Schwarzschild e a "Espaguetificação da astronauta".

No capítulo 4, é apresentado um contexto histórico e teórico, por meio de obras de divulgação científica, sobre alguns conceitos da Teoria da Relatividade Especial juntamente com a utilização de mapas conceituais, os quais, segundo os autores, podem auxiliar no ensino e aprendizagem dessa teoria no ensino médio.

Os dois últimos capítulos são abordadas questões sociais como afetividade e inclusão. No entanto o público alvo é bem diferentes, pois a afetividade é discutida nas séries finais do ensino fundamental (capítulo 5) e a inclusão, bem como outros fatores de ensino-aprendizagem utilizando uma análise crítica de discurso utilizando práticas discursivas, são trabalhadas com docentes do Ensino de Física no Curso de Licenciatura Plena em Ciências Naturais.

Para o primeiro caso, a autora declara que a afetividade é mostrada a partir da análise da participação de uma professora de língua portuguesa do ensino fundamental; onde o amor, a empatia, o carinho e a valorização da comunidade foram características encontradas nas ações da professora na forma de afetividade, que fez com que aumentasse

o interesse e a participação dos alunos nas atividades e se ampliassem as possibilidades de aprendizagem.

Já no quinto capítulo, o estudo se inspira em um referencial teórico que dá suporte a análise crítica de discurso (ACD), cujo embasamento teórico apresenta uma análise dialetizante e historicizada do discurso no interior de seu contexto social, histórico, político e social, sem perder de vista, as condições materiais de existência dos sujeitos sociais diretamente envolvidos nas práticas discursivas estudadas. No entanto, os resultados apresentados pelos autores revelam-se contraditórios e excludores socialmente estando em parcial desacordo do referencial teórico utilizado.

Aos autores dos diversos capítulos, pela dedicação e esforços sem limites, que viabilizaram esta obra que retrata diversas pesquisas em ensino de Física e Ciências Naturais, valorizando a prática do docente, os agradecimentos dos Organizadores e da Atena Editora.

Por fim, esperamos que este livro possa colaborar e instigar mais estudantes, professores e pesquisadores na constante busca de novas metodologias de ensino-aprendizagem, tecnologias e recursos didáticos, promovendo a melhoria na educação do nosso país.

Sabrina Passoni Maravieski

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1..... 1

VIDEOANÁLISE COMO FERRAMENTA DE ENSINO: O USO DO TRACKER EM UM EXPERIMENTO DE QUEDA-LIVRE

Giovani Luz Andrade

Jorge Anderson Paiva Ramos

Luizdarcy de Matos Castro

DOI 10.22533/at.ed.1802128051

CAPÍTULO 2..... 10

FÍSICA DO FENÔMENO NATURAL: RODA D'ÁGUA CAÓTICA DO PONTO DE VISTA DA DINÂMICA NÃO LINEAR

Wellington Martins Filho

Alessandra Carla Furlanetti

DOI 10.22533/at.ed.1802128052

CAPÍTULO 3..... 21

ATIVIDADES INVESTIGATIVAS NO ENSINO DA GRAVITAÇÃO COM FOCO EM BURACOS NEGROS

José Izaias Moreira Scherrer Neto

Lucas Antonio Xavier

Chirlei de Fátima Rodrigues

Wanessa Santos Santana

Tatiane Lemos Perdigão

DOI 10.22533/at.ed.1802128053

CAPÍTULO 4..... 29

A TEORIA DA RELATIVIDADE ESPECIAL E SEUS CONCEITOS: UM OLHAR SOB AS LENTES DA DIVULGAÇÃO CIENTÍFICA

Ian Lima Santana

Ramon Alves dos Santos

Gabriel Fonseca Guimarães

Carlos Takiya

DOI 10.22533/at.ed.1802128054

CAPÍTULO 5..... 42

EM BUSCA DE SOLUÇÕES PARA O ENSINO DE FÍSICA NOS ANOS FINAIS DO ENSINO FUNDAMENTAL: ALGUMAS CONSIDERAÇÕES SOBRE O PAPEL DA INTERDISCIPLINARIDADE E DA AFETIVIDADE

Adriano Marcus Stuchi

DOI 10.22533/at.ed.1802128055

CAPÍTULO 6..... 59

UMA ANÁLISE DO DISCURSO DOS ALUNOS CONCLUINTE DO CURSO DE LICENCIATURA PLENA EM CIÊNCIAS NATURAIS DA UEPA SOBRE O ENSINO DE FÍSICA

Maria Josevett Almeida Miranda

Maria Lúcia Gomes Figueira de Melo

DOI 10.22533/at.ed.1802128056

SOBRE A ORGANIZADORA.....	71
ÍNDICE REMISSIVO.....	72

CAPÍTULO 2

FÍSICA DO FENÔMENO NATURAL: RODA D'ÁGUA CAÓTICA DO PONTO DE VISTA DA DINÂMICA NÃO LINEAR

Data de aceite: 26/05/2021

Wellington Martins Filho

UFPE - Universidade Federal de Pernambuco/PE
<http://lattes.cnpq.br/9341502542658444>

Alessandra Carla Furlanetti

Fatec – Faculdade de Tecnologia de Adamantina/SP; FAPE – Faculdade de Presidente Epitácio/SP
<http://lattes.cnpq.br/1706476296249975>

RESUMO: Nesse trabalho os autores tiveram a intenção de apresentar os conceitos básicos relacionados à dinâmica não-linear e caos. Inicialmente, apresenta-se uma revisão histórica do estudo do caos seguida de uma discussão do sistema da Roda d'água caótica. Aborda-se a montagem experimental desse sistema juntamente com o modelo teórico que explica a física envolvida. Por último destaca-se a importância da não linearidade em várias áreas do conhecimento. Foi utilizado também nesse trabalho uma simples simulação que ajuda na compreensão do tópico central discutido.

PALAVRAS-CHAVE: Roda d'água, Caos, Sistemas caóticos, Sistemas dinâmicos não lineares.

PHYSICS OF THE NATURAL PHENOMENON: CHAOTIC WATER WHEEL FROM THE NON-LINEAR DYNAMICS POINT OF VIEW

ABSTRACT: In this work the authors presented the basic concepts related to nonlinear dynamics and chaos. At the beginning there is a historical review concerning the development of chaos theory followed by the discussion of the water wheel system. The experimental set up is presented along with a theoretical model that explains the physics involved. The importance of nonlinearity in several areas is highlighted at the end of this paper. A simple simulation was also performed throughout this paper that helps with the discussion of the central topic.

KEYWORDS: Chaotic Waterwheel, Chaos, Chaotic systems, Nonlinear dynamic systems.

1 | INTRODUÇÃO

Esse trabalho investigou estudar a Roda d'água caótica do ponto de vista da dinâmica não linear.

O objetivo principal dos autores foi o de introduzir conceitos da dinâmica não linear usando um exemplo simples e que serve como ponto de partida para entender sistemas caóticos mais complexos. Essa abordagem evidenciou o lado mais qualitativo da dinâmica não linear, mas sem deixar de guiar o leitor na construção das equações envolvidas.

2 | UM POUCO DE HISTÓRIA

A história dos sistemas dinâmicos não lineares iniciou com o matemático Poincaré que se propôs a estudar a dinâmica de um sistema gravitacional de três corpos. Este problema é bem mais complexo do que o problema da dinâmica de dois corpos, que possui solução analítica. Quase um século depois, outro matemático chamado Lorenz (1963) estudava problemas meteorológicos a partir de um modelo simplificado da atmosfera, quando se deparou com o que viria a ser conhecido como caos determinístico (VIANA, 2018).

A seguir um relato do histórico breve, com mais detalhes do que foi apresentado acima.

2.1 Um Breve Histórico dos sistemas dinâmicos não lineares e dos sistemas caos

O primeiro atacar sistemas dinâmicos caóticos foi o matemático Jules H. Poincaré (1854-1912), no final do século XIX, ao estudar o problema dos três corpos (MONTEIRO, 2006). Nesse problema, pretendia-se determinar o movimento descrito pelos planetas quando sujeitos a força de atração gravitacional mútua. Motivados sobre a questão da estabilidade do sistema solar, gerações de físicos e matemáticos após Newton tentaram solucionar o problema não linear dos três corpos, o qual mostrou-se ser impossível obter uma solução analítica exata (MONTEIRO, 2006). Ao tratar esse problema, Poincaré desenvolveu métodos pioneiros na análise de sistemas dinâmicos não lineares, percebeu que era possível determinar propriedades qualitativas das soluções de um sistema sem resolvê-lo analiticamente.

As técnicas geométricas e topológicas utilizadas por Poincaré provaram ser poderosas ferramentas na análise de sistemas dinâmicos desse tipo, o que levou ao seu reconhecimento como o “Pai da dinâmica não linear” (LAYEK, 2015).

Uma das principais características que o matemático Poincaré entendeu nos sistemas não lineares que trabalhou foi a de que pequenas diferenças nas condições iniciais poderiam produzir grandes alterações na evolução do sistema, o que mais tarde ficaria conhecido como uma das principais características de sistemas caóticos.

Ainda no final do século XIX, o matemático Aleksander Lyapunov (1857-1918) também contribuiu significativamente para análise de sistemas como esses ao desenvolver sua teoria da estabilidade (MONTEIRO, 2006). As ferramentas matemáticas desenvolvidas por ele passaram a ser amplamente utilizadas na análise de sistemas não lineares, em particular, os que apresentam comportamento caótico, cuja dinâmica pode ser classificada através do expoente de Lyapunov (LAYEK, 2015).

Outro nome marcante no desenvolvimento, compreensão e análise de sistemas dinâmicos caóticos foi o nome do meteorologista Edward Lorenz (1917-2008), que deu suas maiores contribuições no início da década de 1960. Com o auxílio computacional,

Lorenz estudou a convecção atmosférica utilizando um modelo simplificado de equações não lineares associadas e concluiu que características de soluções bastante parecidas com as que Poincaré encontrou anteriormente. Edward Lorenz considerou que o tempo, no sentido meteorológico, agiria de forma imprevisível, e um erro nas medidas das condições climáticas devido a imprecisão comprometeria a validade de qualquer previsão futura. (LAYEK, 2015).

De maneira breve, foi exposto a história da dinâmica não linear, que contou com esses e muitos outros autores que contribuíram para o estado da arte que se tem hoje nas pesquisas dessa área. Atualmente, muitas áreas do conhecimento têm enfrentado a necessidade de lidar com o caos, como engenharia, medicina, ecologia, biologia e a economia. (VIANA, 2018).

Faz-se então necessário compreender bem as nuances desse tipo de fenômeno. Os capítulos seguintes tentam então cumprir esse objetivo do trabalho.

3 | RODA D'ÁGUA CAÓTICA

3.1 Montagem e discussão do conceito de caos

Esse capítulo aborda um sistema físico, simples e muito conhecido, onde a manifestação do caos acontece de maneira clara, a Roda d'água caótica ou Roda d'água de Lorenz ou ainda Roda d'água de Malkus (MALKUS WATERWHEEL, online). Esse sistema, do ponto de vista experimental é bastante simples e pode ser visualizado na Figura 1.



Figura 1: Imagem a esquerda de uma Roda d'água caótica retirada de (CHAOTIC WATERWHEEL, online).

A imagem a direita é de uma Roda d'água caótica construída, em parte, por Wellington Martins Filho e que pode ser acessada em <https://m.youtube.com/watch?v=ADpB57HYfhU&feature=youtu.be>.

Os materiais necessários para montagem do experimento como esse, foram:

- A) Recipientes (copos) onde a água deve ser armazenada, esses copos devem ter um furo na sua base, permitindo assim que parte de água que eles armazenam possa ser escoada para os copos abaixo;
- B) Pregos que prendam esses recipientes e deixe-os livres para se movimentar quando água for despejada neles;
- C) Roda, com eixo central que vai suportar os copos e deve girar mudando os recipientes de lugar;
- D) Fonte de água com vazão constante que alimenta os recipientes e cujo queda d'água passa pelo centro da roda na direção vertical.

Esses são os detalhes e materiais necessários para se montar uma Roda d'água como demonstrado na Figura 2. Dessa forma, água proveniente da fonte cai passando pelo centro da roda e alimenta igualmente o copo que está na altura mais alta e mais baixa da estrutura. Com a configuração em movimento, esse copo mais alto, agora com mais água que antes, promove um torque que faz com que toda a estrutura gire com maior velocidade. Ao mesmo tempo que fornece torque para que o sistema gire, esse mesmo copo alimentado pela fonte de água, agora começa a perder parte de seu conteúdo devido um furo em sua base que faz com que ele nunca fique cheio e, de certa forma, alimente com água de copos vizinhos. Claro que aqui permaneceu assumindo que a vazão de líquido que passa pelo furo do copo é muito menor que a vazão de líquido fornecida pela fonte principal de água.

O que acontece, conforme o tempo passa, é surpreendente. Esse experimento é um exemplo canônico de um sistema físico que apresenta caos, ou seja, em poucas palavras, é um sistema com comportamento imprevisível. De acordo com Strogatz (1994) define-se caos, como:

“Chaos is aperiodic long-term behavior in a deterministic system that exhibits sensitive dependence on initial conditions”.

Em tradução livre tem-se, “Caos é um comportamento não periódico e de longo prazo em um sistema determinístico que exibe sensível dependência com as condições iniciais”. Mas, o que tudo isso quer dizer?

Para começar, “*Comportamento não periódico e de longo prazo*”. Isso quer dizer que não importa o tempo que se deixa o sistema livre para executar sua dinâmica, NUNCA haverá repetição de um determinado “comportamento” do sistema. Por exemplo, duas voltas para direita a cada uma volta para a esquerda e outras situações similares.

Além disso, para a expressão “*sistema determinístico*” considera-se sistemas que não apresentam ruído ou influência de aleatoriedade na sua dinâmica. Por exemplo, se a intenção fosse acrescentar uma contribuição de aleatoriedade do problema, poderia escolher um copo ao acaso para terminar de enchê-lo com água a cada 5 segundos. A dinâmica dessa Roda d'água deixaria de ser dita determinística e seria muito mais difícil de descrever matematicamente.

Por fim, quando falamos de “sensível dependência com as condições iniciais” se refere a uma das assinaturas mais marcantes de sistemas caóticos. Na Figura 2 verificou isso facilmente. Apesar da pequena diferença entre as condições iniciais (uma pequena diferença no ângulo em que a roda começa a girar) foi observado que as trajetórias do centro de massa da roda, conforme o tempo passa, acabam se tornando totalmente distintas.

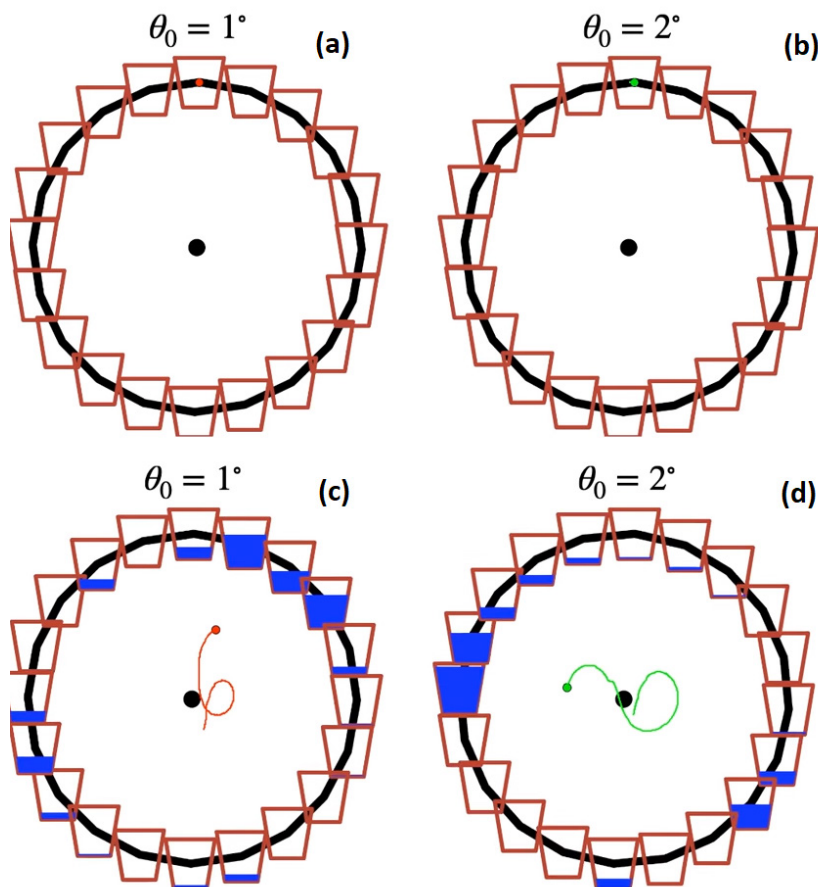


Figura 2: Θ_0 é o ângulo entre o centro do copo mais alto e uma reta vertical que passa pelo centro da roda. Na figura (a) temos $\Theta_0 = 1^\circ$ e na figura (b) temos $\Theta_0 = 2^\circ$, essa pequena diferença se traduz de maneira muito clara nas trajetórias do centro de massa da roda. Imagem retirada de. Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/Malkus_waterwheel

Na próxima sessão destacam-se os detalhes matemáticos do sistema da roda caótica e aborda-se a definição de caos de maneira detalhada.

3.2 Formulação matemática do problema

Primeiro precisou entender quais foram as variáveis envolvidas na descrição do problema, mas antes de discutir essas variáveis, destacou-se aqui que essa abordagem foi baseada em Strogatz (1994) e os autores como Kolá e Gumbs (1992). Tem-se como variáveis:

Θ - Ângulo ;

ω - Velocidade angular;

$m(\Theta-t)$ - Distribuição de massa na aresta exterior da roda.

$Q(t)$ - Taxa que a torneira coloca água na roda; r - Raio da roda;

K - Taxa de vazamento;

ν - Taxa de amortecimento angular;

I - Momento de inércia;

Primeiro começou discutindo o balanço de massa do problema. A equação que rege esse balanço de massa pode ser escrita como na expressão abaixo. É possível justificar cada termo da seguinte forma:

$$\Delta M = \Delta t \left[\int_{\theta_1}^{\theta_2} Q(\theta) d\theta - \int_{\theta_1}^{\theta_2} K m d\theta \right] + m(\theta_1)\omega\Delta t - m(\theta_2)\omega\Delta t \quad (1)$$

Imagine um arco de circunferência da Roda d'água, limitado por Θ_1 e Θ_2 , com $\Theta \in [\theta_1, \theta_2]$ ($[\theta_1, \theta_2] \subset [0, 2\pi]$), nesse arco tem uma contribuição total de massa de água vindo da torneira que é dada por $\int_{\theta_1}^{\theta_2} Q d\theta$. Parte dessa água vaza por um buraco no fundo do copo e toda água vazada é computada como $\int_{\theta_1}^{\theta_2} K m(\theta, t) d\theta$, perceba que a vazão de água é proporcional a distribuição de massa. Os últimos dois termos vêm do fato que quando a roda gira, uma quantidade de massa entra no arco que estamos examinando e outra sai. Como $m(\Theta, t)$ é uma densidade de massa por ângulo então a dimensão final da contribuição dos dois últimos termos tem dimensão de massa. Vamos reescrever os dois últimos termos do lado direito da seguinte maneira:

$$m(\theta_1) - m(\theta_2) = - \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{\partial m}{\partial \theta} d\theta \quad (2)$$

Veja que do lado direito temos Δt e que ele pode passar dividindo para o lado esquerdo, onde ficamos com $\frac{\Delta M}{\Delta t}$. No limite $\Delta t \rightarrow 0$, ficamos com $\frac{\Delta M}{\Delta t} = \frac{dM}{dt} = \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{\partial m}{\partial t} d\theta$ e finalmente:

$$\frac{\partial m}{\partial t} = Q(\theta) - Km - \omega \frac{\partial m}{\partial \theta} \quad (3)$$

O próximo passo é estudar o balanço do torque. Vamos usar a mesma abordagem que no primeiro caso:

$$I \frac{\partial \omega}{\partial t} = -v\omega + gr \int_0^{2\pi} m(\theta, t) \text{sen}(\theta) \quad (4)$$

A primeira expressão nada mais é que um fator de amortecimento devido ao atrito entre as peças. O último termo vem do fato de que:

$$d\tau = dMgr \text{sen}\theta, \text{ mas } dM = md\theta \quad (5)$$

Onde calcula-se o torque gerado pela força peso num elemento infinitesimal de massa. Ou seja, a contribuição para o torque, se integrarmos em todo o domínio de Θ , com $\Theta \in [0, 2\pi]$, fica como na expressão (4).

Apesar de ter as duas equações que precisava, fica muito difícil resolver o sistema de EDO's. Dessa forma, vamos usar um truque que permite que encontremos um resultado muito interessante para tais equações. Vamos expandir $m(\Theta, t)$ e $Q(\Theta)$ em série de Fourier da seguinte forma:

$$m(\theta, t) = \sum_{n=0}^{\infty} [a_n(t) \text{sen}n\theta + b_n(t) \text{cos}n\theta] \text{ e } Q(\theta) = \sum_{n=0}^{\infty} q_n \text{cos}n\theta \quad (6)$$

Perceba aqui que na expansão de $Q(\Theta)$ temos apenas cossenos, isso é justificado pelo fato de que a fonte abastece o copo que está imediatamente abaixo dela e contribuições no sentido de Θ são iguais à $-\Theta$ (esse argumento se torna mais forte se o leitor imaginar a roda em movimento).

Substituindo (6) em (3) obtemos, portanto,

$$\frac{da_n}{dt} = n\omega b_n - K a_n \text{ e } \frac{db_n}{dt} = -n\omega a_n - K b_n + q_n \quad (7)$$

Substituindo (6) em (4) e usando as conhecidas relações de ortogonalidade entre as funções seno e cosseno obtemos

$$I \frac{d\omega}{dt} = -\omega v + \pi g r a_1 \quad (8)$$

São as condições de ortogonalidade que permitem apenas o caso $n = 1$ apareça nessa equação, além disso, se escrevermos as equações (7) para o caso $n = 1$ e juntarmos agora essas duas equações com (8) obtemos,

$$\frac{da_1}{dt} = \omega b_1 - K a_1; \quad \frac{db_1}{dt} = -\omega a_1 - K b_1 + q_1; \quad \frac{d\omega}{dt} = (-\omega v + \pi g r a_1)/I; \quad (9)$$

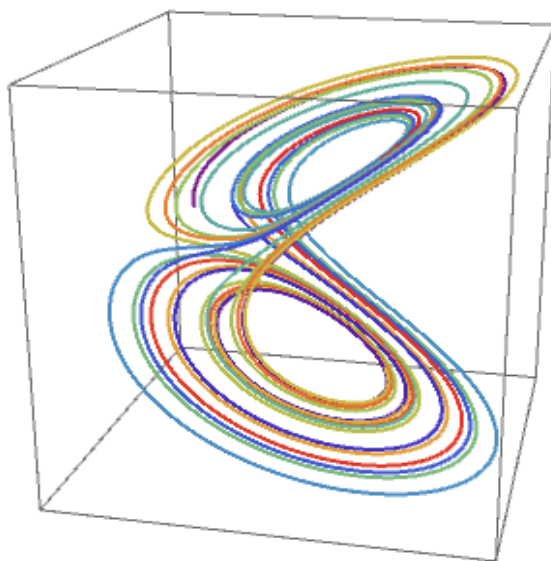


Figura 4: Atrator estranho de Lorenz. Ele pode ser observado quando resolvemos numericamente as equações (9), acima e plotamos o vetor solução, $(a_i(t), b_i(t), \omega(t)) = (x(t), y(t), z(t))$. Para essa simulação utilizamos os seguintes valores de parâmetros $a_1(0) = 0.62$, $b_1(0) = 0.9$, $\omega(0) = 1.45$, $\sigma = 2.96$ nas equações (9). Esse gráfico foi gerado com auxílio do Wolfram Demonstration Project (2012) Projeto Lorenz's Water Wheel.

Esse conjunto de equações quando resolvido numericamente, para valores específicos dos parâmetros, nos oferece em soluções para (x,y,z) , que quando plotadas no gráfico resultam na Figura 4. Essa mesma Figura é uma das mais conhecidas no contexto de equações não lineares e caos sendo chamada de *Atrator estranho de Lorenz* (mais a frente justifica tal nome). Nessa Figura 4 pode verificar as características principais de um sistema caótico e aproveitamos para lembrá-las.

Começando de um ponto em particular (condição inicial das equações) observou o vetor de soluções viajar o espaço tridimensional e traçar uma trajetória espiral ao redor de uma região que chamamos C_1 . Essa região especial não é única e em pouco tempo vemos a trajetória de nossa solução se afastar dessa região e espiralar ao redor de outra região chamada C_2 . Não importa quanto tempo foi observado a trajetória formada por nosso vetor solução, ele sempre alterna entre C_1 e C_2 , de maneira irregular e imprevisível. Isso nada mais é que uma manifestação da *não periodicidade* de um sistema caótico que citamos na sessão anterior.

Outra característica de nosso atrator estranho é a de que a trajetória do vetor de solução para duas condições iniciais muito próximas, porém distintas, é completamente diferente, ou seja, o atrator possui *sensível dependência com as condições iniciais*. Isso fica mais claro se repetirmos a simulação com condições iniciais quase idênticas ao que foi apresentado da Figura 4.

Por último, mas não menos importante, devemos lembrar que o sistema não possui nenhum fator de aleatoriedade ou ruído. Comentado anteriormente como um fator probabilístico poderia ser adicionado ao nosso problema. Ou seja, nossa Roda d'água é um *sistema determinístico*. Uma pergunta que o leitor pode carregar é *Se não existe nenhum fator probabilístico o que manifesta a imprevisibilidade da Roda d'água caótica?* Essa é uma boa pergunta e a resposta pode ser dividida em duas partes. A primeira parte é apenas uma observação, perceba como *Caos* no contexto possui uma definição diferente do que é coloquialmente usado. No dia a dia, refere-se algo caótico como sendo um tanto desordenado, imprevisível ou até aleatório. Então é importante destacar essa diferença. A segunda parte de nossa resposta é mais direta. Pode dizer que a *não linearidade*, junto com os valores corretos dos parâmetros do nosso problema é que são os responsáveis pelo regime caótico que foi observado, as não linearidades aqui são ωa_1 e ωb_1 e nelas se escondem os ingredientes da imprevisibilidade do caos. Para entender com mais detalhe esses regimes diferentes para valores diversos dos parâmetros do sistema de EDO's convidamos os leitores a ler de maneira completa as referências dos autores (KOLÁ; GUMBS, 1992 e LAYEK, 2015).

4 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

No último capítulo descrito procurou-se destacar a relevância dos fenômenos discutidos até aqui. Nesse sentido, é necessário um último comentário sobre o sistema físico, foco desse trabalho. Pode-se dizer que as equações (9), com uma pequena mudança de variáveis são levadas em um conjunto muito conhecido de equações chamadas equações de Lorenz. Tal mudança de variável é descrita em Moyerman (2006) e dá origem ao seguinte conjunto de EDO's:

Fazemos a seguinte mudança de variáveis,

$$a_1 = \frac{Kv}{\pi gr} y; \quad b_1 = \frac{-Kv}{\pi gr} + \frac{q_1}{K}; \quad \omega = Kx; \quad t = \frac{\tau}{K}; \quad (10)$$

Para obter,

$$\frac{dx}{dt} = \sigma(y - x); \quad \frac{dy}{dt} = r'x - y - xz; \quad \frac{dz}{dt} = xy - z \quad (11)$$

Que são as equações de Lorenz com $b = 1$. Com essas mudanças de variáveis definimos $\sigma = \frac{v}{Kl}$ e $r' = \frac{\pi gr q_1}{K^2 v}$. As equações foram obtidas por Lorenz em 1963, quando estudava uma versão simplificada do que acontece na dinâmica atmosférica, esse foi um evento importantíssimo na evolução da dinâmica não linear. Foram nessas equações que pela primeira vez o atrator de Lorenz foi observado.

Existem outros contextos onde o caos também é observado: Circuitos elétricos, processos bioquímicos, lasers, sistemas neurais e muitos outros, cada um com sua devida aplicação. Fica então clara a importância da compreensão dos fenômenos aqui descritos, tanto do ponto de vista da engenharia quanto do ponto de vista da ciência básica e aplicada.

Nesse trabalho, os autores procuraram apresentar a Roda d'água caótica como um sistema simples e onde se pode enxergar claramente essa dinâmica exótica do caos a fim de passar para o leitor alguma intuição sobre esse campo de pesquisa que é reconhecido como a terceira revolução da física do século XIX. Ao mesmo tempo, espera-se que essa apresentação tenha instigado os leitores mais curiosos a se aprofundarem no assunto.

Por último, o autor Wellington Martins Filho gostaria de agradecer a Rômulo Gurgel e Vitor Alves por contribuírem na montagem e gravação do experimento demonstrado no lado direito da Figura 1.

REFERÊNCIAS

ARGYRIS, J. et al. **An Exploration of Dynamical Systems and Chaos: Completely Revised and Enlarged Second Edition**. Índia: Springer, 2015.

CHAOTIC WATERWHEEL. The chaotic theory was surmised by mathematician. Edward Norton Lorenz. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=E8O66UuQiQ8>. Acesso em: 05 mar. 2021.

KOLÁ, Miroslav; GUMBS, Godfrey. Theory for the experimental observation of chaos in a rotating waterwheel. **Phys Rev A**, v. 45, n. 2, p. 626-637, 1992. Disponível em: <https://journals.aps.org/pr/abstract/10.1103/PhysRevA.45.626>. Acesso em: 03 mar. 2021. Doi: 10.1103/physreva.45.626.

LAYEK, G. **An Introduction to Dynamical Systems and Chaos**. Índia: Springer, 2015. E-book.

LORENZ, Edward N. **The essence of chaos**. Estados Unidos: University of Washington Press, 1995. 240 p.

MALKUS WATERWHEEL. Referência obtida de **Lorenz waterwheel** ou **chaotic waterwheel**. Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/Malkus_waterwheel. Acesso em: 05 mar. 2021.

MONTEIRO, L. H. A. **Sistemas dinâmicos**. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2006.

MOYERMAN, Stephanie. **Exploring the Lorenz Equations through a Chaotic Waterwheel**. 2006. Disponível em: <https://www.math.hmc.edu/~dyong/math164/2006/moyerman/finalreport.pdf>. Acesso em: 04 mar. 2021.

RODA D'ÁGUA MALKUS. Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/Malkus_waterwheel. Acesso em: 03 mar. 2021.

STROGATZ, Stefen H. **Nonlinear Dynamics an Chaos**: With applications to physics, biology and chemistry, 1994.

VIANA, William César. **Análise de dinâmica não linear e caracterização de caos**: um estudo sobre um sistema unificado. 2018. 86f. Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas. Departamento de Engenharia Elétrica.

WATERWHEELS. Rômulo Gurgel e Wellington Martins Filho (IDNL). Disponível em: <https://m.youtube.com/watch?v=ADpB57HYfhU&feature=youtu.be>. Acesso em: 03 mar. 2021.

ÍNDICE REMISSIVO

A

Afetividade 42, 43, 45, 50, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58

Anos Finais Ensino Fundamental 42

Aprendizagem 1, 21, 25, 27, 29, 42, 43, 44, 46, 48, 50, 54, 55, 60, 67, 71

Aulas 2, 8, 21, 22, 24, 44, 46, 49, 50, 54, 64, 65, 66, 68

B

Buraco Negro 21, 41

C

Caos 10, 11, 12, 13, 14, 17, 18, 19, 20

Ciência 19, 22, 23, 25, 27, 30, 31, 32, 37, 40, 47, 48, 56, 58, 60, 63, 66, 67, 68

Ciências Naturais 21, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 66, 68, 70

Concluintes 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 68, 69, 70

Conhecimento 10, 12, 22, 30, 31, 32, 37, 38, 40, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 62, 63, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71

D

Desafios 22

Divulgação Científica 29, 31, 32, 37, 40

E

Ensino 1, 2, 8, 21, 22, 26, 27, 29, 40, 42, 44, 57, 58, 59, 60, 64, 66, 71

Ensino de Física 1, 2, 8, 26, 27, 42, 48, 49, 52, 55, 57, 58, 59, 60, 63, 64, 66

Ensino Médio 24, 26, 27, 29, 31, 32, 40, 54, 64, 71

F

Física 2, 1, 2, 8, 9, 10, 19, 21, 22, 23, 25, 26, 27, 29, 30, 31, 32, 33, 35, 37, 39, 40, 41, 42, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71

I

Interdisciplinar 43, 44, 45, 46, 47, 49, 50, 51

Interdisciplinaridade 42, 43, 44, 45, 46, 47, 50, 56, 57, 58

Investigação 21, 22, 23, 24, 27, 49, 60, 61, 62

M

Mecânica Clássica 1, 2, 8, 9, 30, 33, 34, 35, 36, 65

P

Pesquisa 1, 3, 8, 19, 22, 24, 26, 40, 41, 45, 48, 53, 57, 59, 60, 61, 62, 63, 65, 70, 71

Práticas Discursivas 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 69

Provas 31, 63, 66

Q

Queda-Livre 1, 2, 7, 8

R

Relatividade Especial 29, 30, 31, 32, 33, 35, 36, 37, 40, 41

Resultados 1, 3, 4, 6, 7, 8, 24, 43, 50, 53, 54, 59, 60, 69

Roda d'Água 10, 12, 13, 15, 18, 19

S

Sistemas 10, 19

Sistemas Caóticos 10, 11, 14

Sistemas Dinâmicos Não Lineares 10, 11

Software 1, 2, 3, 4, 7, 8, 9

T

Tracker 1, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9

V

Validação a Priori 21

Videoanálise 1, 3, 4, 6, 8

Física:

Universo e os Fenômenos Naturais

2

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

Atena
Editora

Ano 2021

Física:

Universo e os Fenômenos Naturais

2

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

Atena
Editora

Ano 2021