

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 Cremona

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 Alfenas

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 Livia 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

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 quaternárias (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).

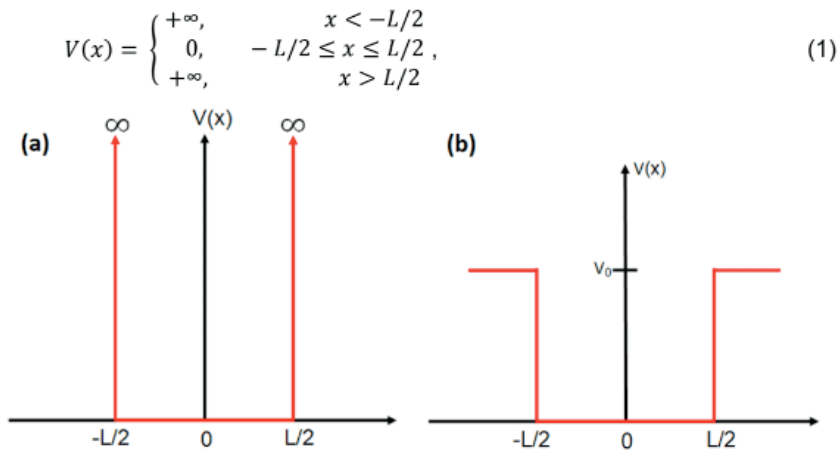


Figura 1: Representação esquemática (a) de um poço infinito e (b) de um poço finito.

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.

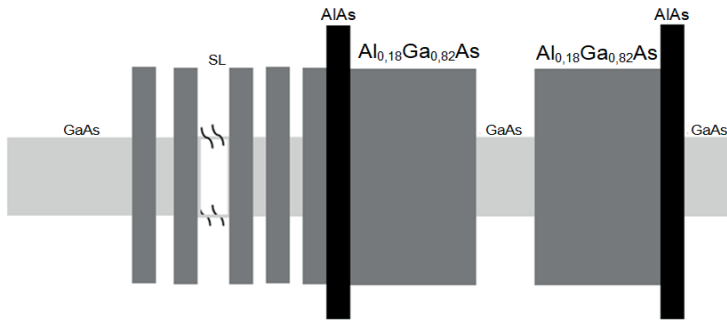


Figura 2 – Esquema estrutural da amostra analisada.

A amostra foi caracterizada através da técnica de espectroscopia de fotoluminescência, à temperatura de 8 K, com excitação proveniente de um laser de estado sólido emitindo em 440 nm e 6 μW de potência. A detecção foi feita utilizando um espectrômetro Andor de 19,3 centímetros e uma CCD de Silício.

4 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para calcularmos os níveis de energia quantizados no poço vamos utilizar o modelo de poço quântico finito. Os *gaps* dos materiais que compõe o poço podem ser calculados em função da temperatura através das equações (BLAKEMORE, 1982):

$$E_g(T) = 1,519 - \frac{5,405 \cdot 10^{-4} T^2}{(T+204)} \text{ (eV)}, \quad (11)$$

$$E_g(T) = 1,519 + 1,155x + 0,37x^2 - \frac{5,41 \cdot 10^{-4} T^2}{(T+204)} \text{ (eV)}, \quad (12)$$

A equação (11) é utilizada para calcular o *gap* do GaAs, enquanto para o cálculo do *gap* do $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ utilizamos a equação (12). Nestas equações T é a temperatura do material e o parâmetro x na equação (12) é a concentração de Al (alumínio) na liga ternária $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$. Utilizando a equação (11) com uma temperatura de 8 K a energia de *gap* do GaAs é 1,51884 eV e utilizando a equação (12), na mesma temperatura e com concentração de 18% de alumínio ($x = 0,18$) obtemos a energia de *gap* para o $\text{Al}_{0,18}\text{Ga}_{0,82}\text{As}$ igual a 1,73872 eV.

Neste tipo de estrutura o *offset* da banda de valência é determinado por $E_v = 0,17x$ (EKPUNOBI, 2002), onde x é a concentração de alumínio da estrutura (18%), assim temos $E_v = 0,0306$ eV. A partir dos valores de E_v e dos *gaps* do GaAs e AlGaAs à temperatura de 8 K é possível determinar o *offset* da banda de condução (E_c) como: $E_c = 1,73872 - 1,51884 - 0,0306 = 0,18928$ eV. O *offset* da banda de condução equivale a profundidade do poço de potencial para os elétrons. De maneira similar é possível determinar

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 \AA .

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

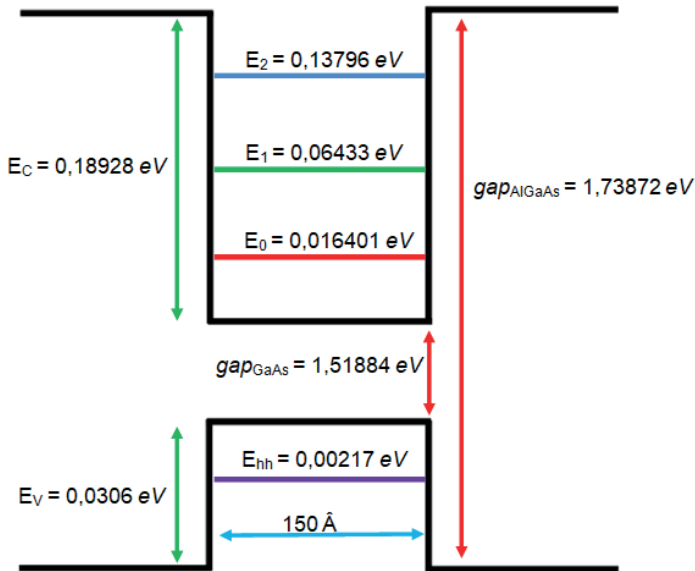


Figura 3 – Representação esquemática dos níveis energéticos do poço quântico finito.

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.

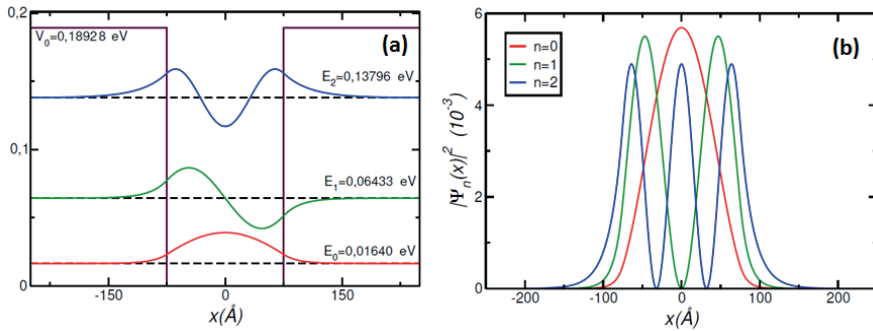


Figura 4 – (a) funções de onda ($0,3 \psi_n(x)$) e (b) densidades de probabilidade calculadas para os 3 níveis do poço.

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.

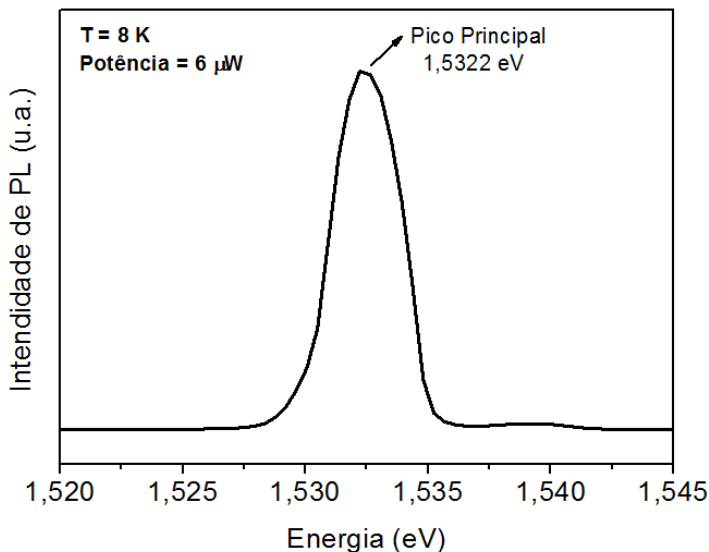


Figura 5 – Espectro de fotoluminescência à temperatura de 8 K.

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.

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

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
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