

Física:

Universo e os Fenômenos Naturais

Edson Ribeiro de Britto de Almeida Junior
(Organizador)

Atena
Editora

Ano 2021

Física:

O Universo e os Fenômenos Naturais

Edson Ribeiro de Britto de Almeida Junior
(Organizador)

Atena
Editora

Ano 2021

Editora Chefe

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Assistentes Editoriais

Natalia Oliveira

Bruno Oliveira

Flávia Roberta Barão

Bibliotecária

Janaina Ramos

Projeto Gráfico e Diagramação

Natália Sandrini de Azevedo

Camila Alves de Cremo

Luiza Alves Batista

Maria Alice Pinheiro

Imagens da Capa

Shutterstock

Edição de Arte

Luiza Alves Batista

Revisão

Os Autores

2021 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do Texto © 2021 Os autores

Copyright da Edição © 2021 Atena Editora

Direitos para esta edição cedidos à Atena Editora pelos autores.



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

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

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

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

Conselho Editorial

Ciências Humanas e Sociais Aplicadas

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

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

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

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

Ciências Agrárias e Multidisciplinar

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

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

Física: o universo e os fenômenos naturais

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

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

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

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

ISBN 978-65-5706-903-5

DOI 10.22533/at.ed.035211903

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

CDD 530

Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166

Atena Editora

Ponta Grossa – Paraná – Brasil
Telefone: +55 (42) 3323-5493

www.atenaeditora.com.br

contato@atenaeditora.com.br

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

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

Data de aceite: 01/03/2021

Lucas S. de Lara

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

Danilo V. dos Santos

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

Derik W. Gryczak

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

Taiza A.S. do Carmo

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

Alexandre C. Junior

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

Andressa Novatski

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

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

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

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

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

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

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

1 | INTRODUÇÃO

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

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

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

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

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

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

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

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

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

2 | METODOLOGIA

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

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

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

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

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

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

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

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

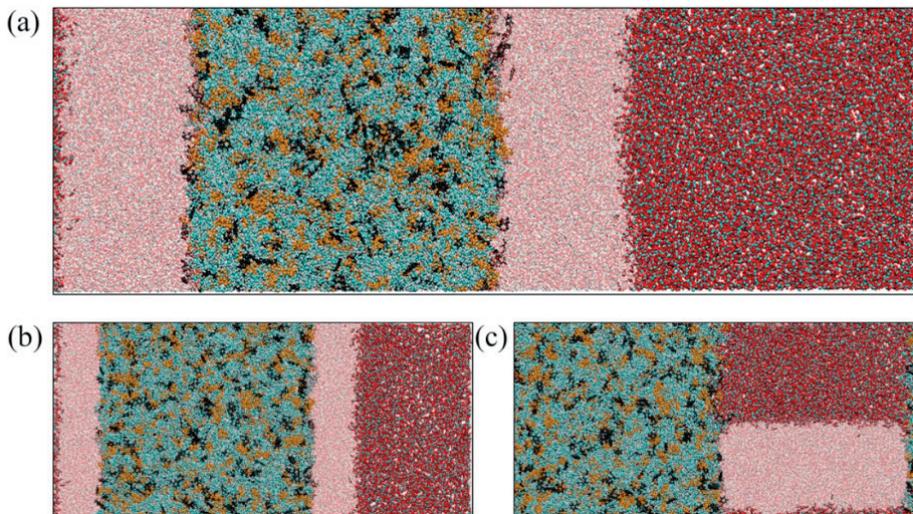


Figura 1: Configuração inicial das interfaces binárias (H_2O ou Salmoura)/ CO_2 /óleo (após a fase de equilíbrio). Espessura (L_z) para a salmoura e fluidos de CO_2 : (a) 5,0 e 10,0 nm; (b) 2,5 e 5,0 nm, respectivamente. (c) Interfaces ternárias (H_2O ou Salmoura)+ CO_2 +óleo. Todas as configurações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

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

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

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

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

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

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

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

acordo com,

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

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

3 | RESULTADO E DISCUSSÕES

3.1 Fluidos binários

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

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

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

g/cm³, respectivamente.

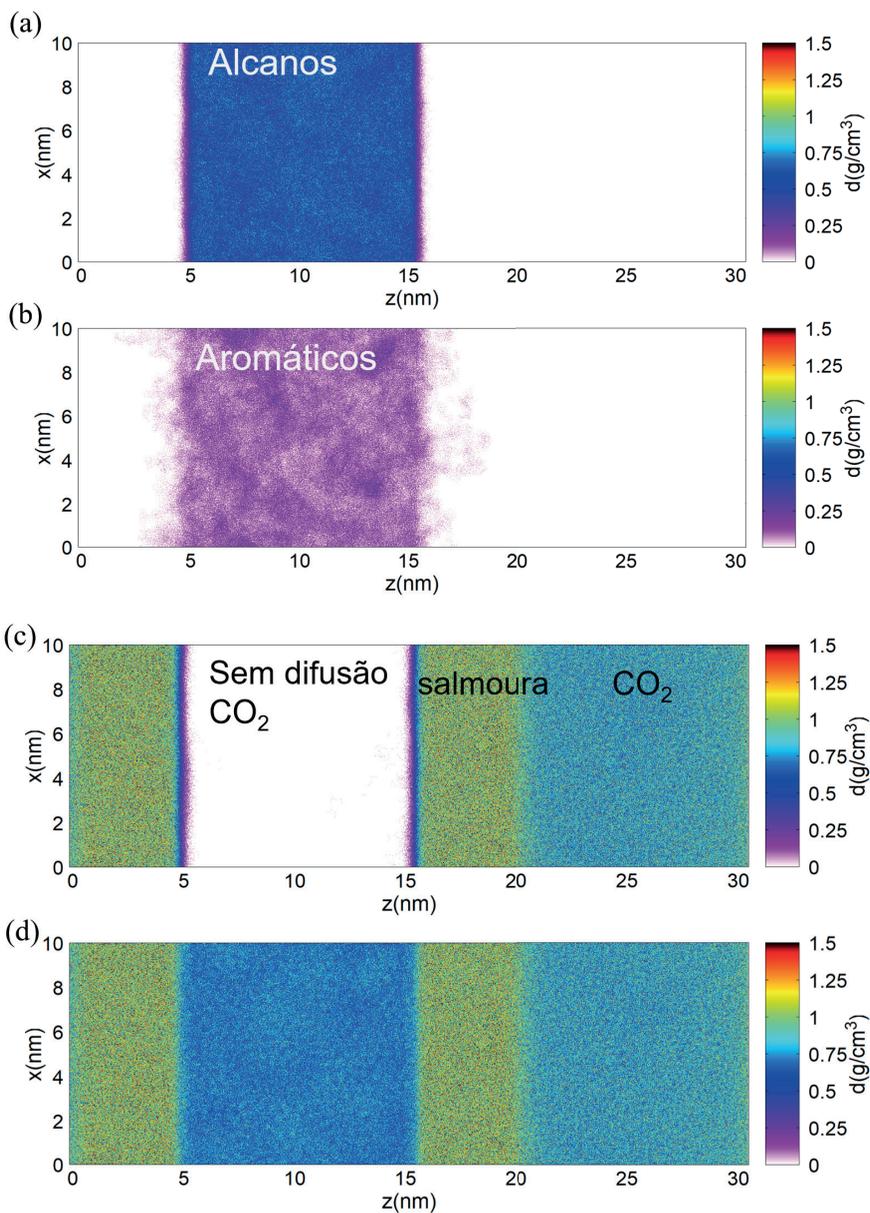


Figura 2: Perfil de densidade de acordo com o espessura do fluido: 5,0 nm de soluções de salmoura (8,0/2,0%) NaCl/CaCl₂; (a) Apenas moléculas de alcano, (b) Moléculas aromáticas, (c) Salmoura+CO₂, sem difusão de CO₂ na fase oleosa, e, (d) Sistema Total. Interfaces a 300K e 150 atm.

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

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

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

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

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

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

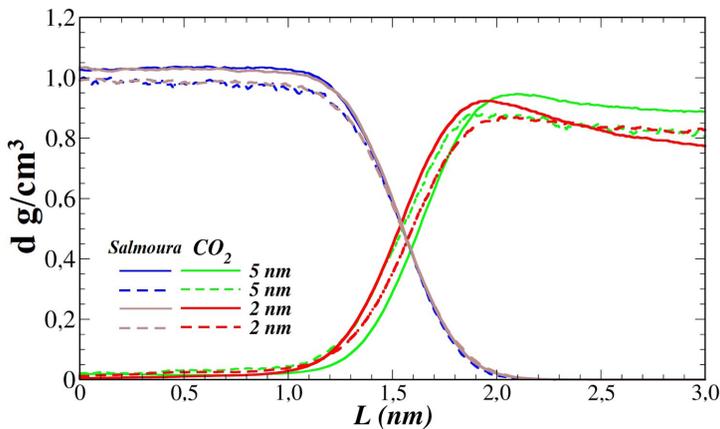


Figura 3: Zoom no perfil de densidade de fluidos em um sistema para diferentes espessuras e concentrações de sal a 300K e 150 atm. Linha completa: Salmoura [H₂O+(8,0/2,0%) NaCl/CaCl₂]; Linha pontilhada: H₂O puro. Com 5,0 nm de espessuras para os sistemas de salmoura e H₂O puro. L é a espessura da região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

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

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

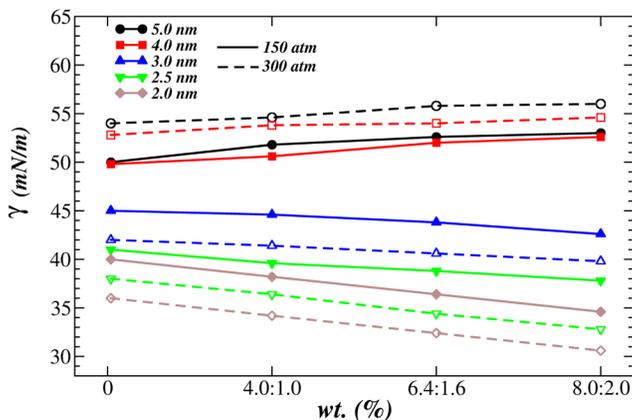


Figura 4: Tensão interfacial para as interfaces binárias fluido/óleo. A tensão interfacial depende da salinidade e das diferentes pressões a 300K.

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

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

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

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

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

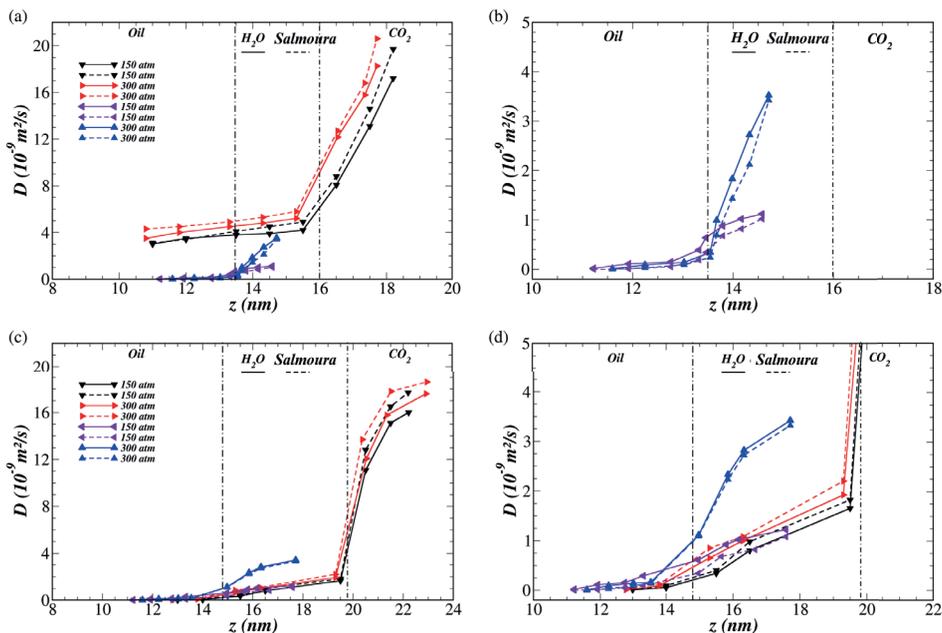


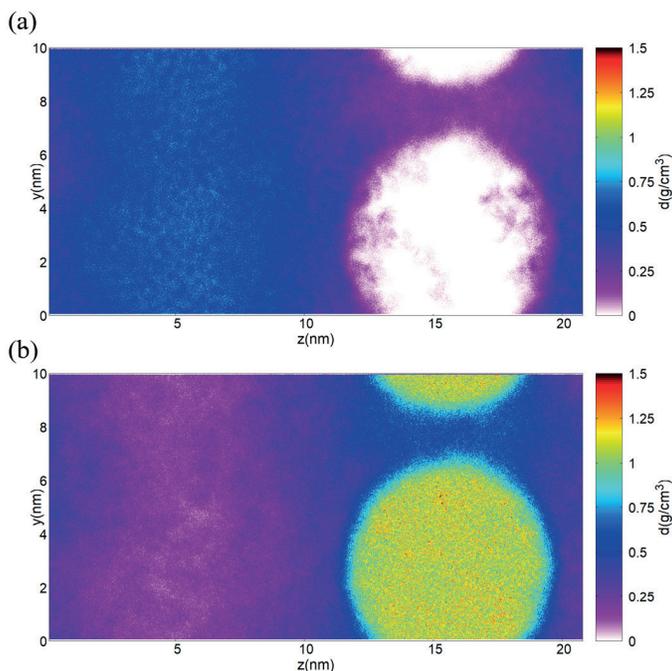
Figura 5: Perfil de difusão de acordo com espessura do fluido: 2,0 nm (a) H_2O (linhas completas) e Salmoura $H_2O+(8,0/2,0\%) NaCl/CaCl_2$ (linhas pontilhadas); 5,0 nm (c) H_2O e Salmoura $H_2O+(8,0/2,0\%) NaCl/CaCl_2$. No sistema foram consideradas as moléculas de CO_2 à 300K e 150 atm. As figuras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

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

3.2 Fluidos ternários

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

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



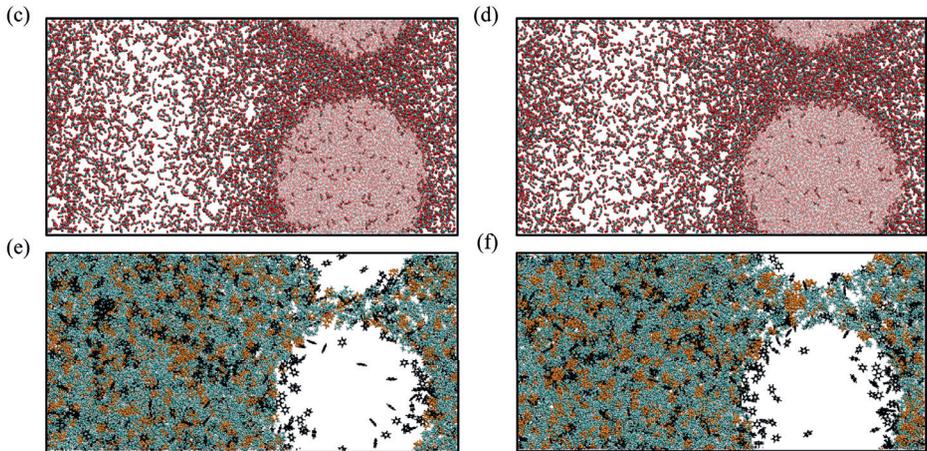


Figura 6: Perfil de densidade para interface ternária ((H₂O ou salmoura)+CO₂/óleo); (a) Somente o óleo e (b) Salmoura (8,0/2,0%)/CO₂; Configuração final para (c) H₂O+CO₂/óleo e (d) Salmoura+CO₂/óleo, onde as moléculas de óleo são omitidas; (e) e (f) moléculas de óleo em relação a (c) e (d), respectivamente.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

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

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

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

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

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

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

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

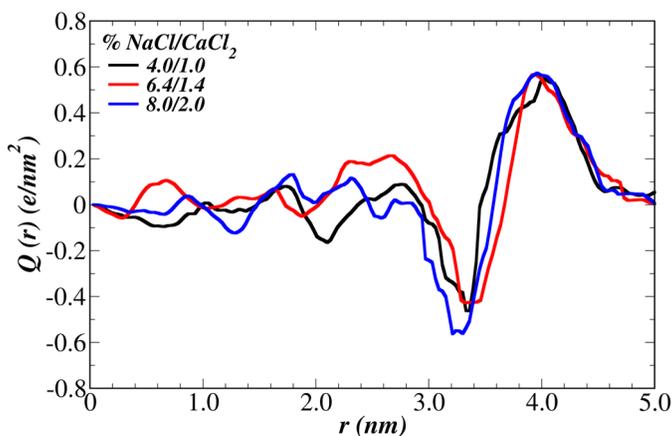


Figura 7: Carga líquida cumulativa, $Q(r)$ com diferentes concentrações de sal a 300K e 150 atm.

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

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

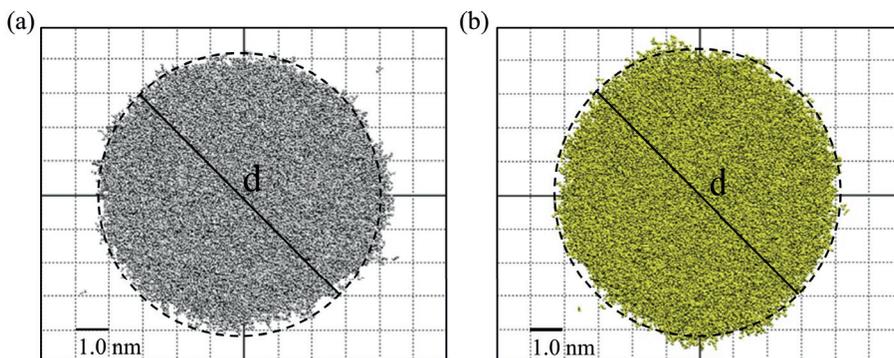


Figura 8: A determinação do diâmetro, d , para as gotas cilíndricas de (a) H_2O pura e (b) salmoura (8.0/2.0%) $\text{NaCl}/\text{CaCl}_2$.

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

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

em média quando comparada à densidade do óleo puro.

4 | CONCLUSÕES

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

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

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

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

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

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CENAPAD-SP e a UEPG.

REFERÊNCIAS

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

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

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

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

ÍNDICE REMISSIVO

A

Aplicações Físicas 8, 79

Aprendizagem de física 8, 100

B

Brinquedos 8, 79, 80, 86

D

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

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

E

Eletromagnetismo 8, 72, 74, 78

Elétron-Buraco 5, 7, 1, 8, 10

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

Ensino Tradicional 101

F

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

G

Giroscópios 8, 79

I

Inclusão 6, 95, 100, 101, 115

Instituto Federal do Amazonas 8, 100

Interfaces ternárias 28, 35, 38

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

J

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

M

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

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

Molas associadas em série 61, 63, 64

Molhabilidade 7, 23

P

Piões 8, 79, 81

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

Precipitável 5, 7, 12, 13, 21

Proposta Experimental 8, 72

R

Resistência do ar 8, 88, 95

S

Simulação Numérica 7, 1

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

Space debris 7, 44, 52

Spinners 8, 79

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

T

Termômetro Infravermelho 14, 15, 16, 17, 20

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

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

Física:

Universo e os Fenômenos Naturais

www.atenaeditora.com.br

contato@atenaeditora.com.br

@atenaeditora

www.facebook.com/atenaeditora.com.br



Atena
Editora

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