



# As Engenharias frente a Sociedade, a Economia e o Meio Ambiente 3

---

Henrique Ajuz Holzmann  
(Organizador)

Henrique Ajuz Holzmann  
(Organizador)

As Engenharias frente a Sociedade, a  
Economia e o Meio Ambiente 3

Atena Editora  
2019

2019 by Atena Editora  
Copyright © Atena Editora  
Copyright do Texto © 2019 Os Autores  
Copyright da Edição © 2019 Atena Editora  
Editora Executiva: Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Antonella Carvalho de Oliveira  
Diagramação: Natália Sandrini  
Edição de Arte: Lorena Prestes  
Revisão: Os Autores

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores. 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.

### **Conselho Editorial**

#### **Ciências Humanas e Sociais Aplicadas**

Prof. Dr. Álvaro Augusto de Borba Barreto – Universidade Federal de Pelotas  
Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília  
Prof. Dr. Constantino Ribeiro de Oliveira Junior – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Cristina Gaio – Universidade de Lisboa  
Prof. Dr. Deyvison de Lima Oliveira – Universidade Federal de Rondônia  
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionele delle Figlie de Maria Ausiliatrice  
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande  
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

#### **Ciências Agrárias e Multidisciplinar**

Prof. Dr. Alan Mario Zuffo – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul  
Prof. Dr. Alexandre Igor Azevedo Pereira – Instituto Federal Goiano  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná  
Prof. Dr. Darllan Collins da Cunha e Silva – Universidade Estadual Paulista  
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia  
Prof. Dr. Jorge González Aguilera – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul  
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará  
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas

#### **Ciências Biológicas e da Saúde**

Prof. Dr. Benedito Rodrigues da Silva Neto – Universidade Federal de Goiás  
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Elane Schwinden Prudêncio – Universidade Federal de Santa Catarina  
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria  
Prof. Dr. José Max Barbosa de Oliveira Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará

Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão  
Profª Drª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Profª Drª 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. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará  
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

### **Conselho Técnico Científico**

Prof. Msc. Abrãao Carvalho Nogueira – Universidade Federal do Espírito Santo  
Prof. Dr. Adaylson Wagner Sousa de Vasconcelos – Ordem dos Advogados do Brasil/Seccional Paraíba  
Prof. Msc. André Flávio Gonçalves Silva – Universidade Federal do Maranhão  
Prof.ª Drª Andreza Lopes – Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento Acadêmico  
Prof. Msc. Carlos Antônio dos Santos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro  
Prof. Msc. Daniel da Silva Miranda – Universidade Federal do Pará  
Prof. Msc. Eliel Constantino da Silva – Universidade Estadual Paulista  
Prof.ª Msc. Jaqueline Oliveira Rezende – Universidade Federal de Uberlândia  
Prof. Msc. Leonardo Tullio – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Prof.ª Msc. Renata Luciane Polsaque Young Blood – UniSecal  
Prof. Dr. Welleson Feitosa Gazel – Universidade Paulista

<b>Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)</b>	
E57	As engenharias frente a sociedade, a economia e o meio ambiente 3 [recurso eletrônico] / Organizador Henrique Ajuz Holzmann. – Ponta Grossa (PR): Atena Editora, 2019. – (As Engenharias Frente a Sociedade, a Economia e o Meio Ambiente; v. 3)  Formato: PDF Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader Modo de acesso: World Wide Web Inclui bibliografia ISBN 978-85-7247-432-0 DOI 10.22533/at.ed.320192506  1. Engenharia – Aspectos sociais. 2. Engenharia – Aspectos econômicos. 3. Desenvolvimento sustentável. I. Holzmann, Henrique Ajuz. II. Série.  CDD 658.5
<b>Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422</b>	

Atena Editora  
Ponta Grossa – Paraná - Brasil  
[www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)  
contato@atenaeditora.com.br

## APRESENTAÇÃO

As obras As Engenharias frente a Sociedade, a Economia e o Meio Ambiente Volume 1, 2, 3 e 4 abordam os mais diversos assuntos sobre métodos e ferramentas nas diversas áreas das engenharias a fim de melhorar a relação do homem com o meio ambiente e seus recursos.

O Volume 1 está disposto em 31 capítulos, com assuntos voltados a engenharia do meio ambiente, apresentando processos de recuperação e reaproveitamento de resíduos e uma melhor aplicação dos recursos disponíveis no ambiente, além do panorama sobre novos métodos de obtenção limpa da energia.

Já o Volume 2, está organizado em 32 capítulos e apresenta uma vertente ligada ao estudo dos solos e águas, com estudos de sua melhor utilização, visando uma menor degradação do ambiente; com aplicações voltadas a construção civil de baixo impacto.

O Volume 3 apresenta estudos de materiais para aplicação eficiente e econômica em projetos, bem como o desenvolvimento de projetos mecânico e eletroeletrônicos voltados a otimização industrial e a redução de impacto ambiental, sendo organizados na forma de 28 capítulos.

No último Volume, são apresentados capítulos com temas referentes a engenharia de alimentos, e a melhoria em processos e produtos.

Desta forma um compendio de temas e abordagens que facilitam as relações entre ensino-aprendizado são apresentados, a fim de se levantar dados e propostas para novas discussões em relação ao ensino nas engenharias, de maneira atual e com a aplicação das tecnologias hoje disponíveis.

Boa leitura

Henrique Ajuz Holzmann

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>1</b>
ANÁLISE DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DE COMPÓSITOS CERÂMICOS DE ALUMINA-ZIRCÔNIA PARA APLICAÇÃO COMO FERRAMENTAS DE CORTE	
Miguel Adriano Inácio	
Maria do Carmo de Andrade Nono	
José Vitor Cândido de Souza	
Sergio Luiz Mineiro	
Daniel Alessander Nono	
<b>DOI 10.22533/at.ed.3201925061</b>	
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>10</b>
SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE MODELO ELASTOPLÁSTICO EM ROCHA CARBONÁTICA CARSTIFICADA	
Rayane Conceição Ribeiro da Silveira Mattos	
Daniel Araújo Farias de Melo	
Marinésio Pinheiro de Lima	
Tiago de Freitas Viana	
Igor Fernandes Gomes	
Leonardo José do Nascimento Guimarães	
<b>DOI 10.22533/at.ed.3201925062</b>	
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	<b>26</b>
A INFLUÊNCIA DO NITROGÊNIO EM AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS COM APLICAÇÃO EM PRÓTESES ORTOPÉDICAS	
Glauber Rodrigues Cerqueira de Cerqueira	
Pedro Eliézer de Araújo Júnior	
<b>DOI 10.22533/at.ed.3201925063</b>	
<b>CAPÍTULO 4</b> .....	<b>42</b>
MICROPOROUS ACTIVATED CARBON FIBER FELT FROM BRAZILIAN TEXTILE PAN FIBER: PREPARATION, CHARACTERIZATION AND APPLICATION AS SUPERCAPACITOR ELECTRODE	
Jossano Saldanha Marcuzzo	
Aline Castilho Rodrigues	
Andres Cuña	
Nestor Tancredi	
Eduardo Mendez	
Heide Heloise Bernardi	
Mauricio Ribeiro Baldan	
<b>DOI 10.22533/at.ed.3201925064</b>	
<b>CAPÍTULO 5</b> .....	<b>55</b>
ANÁLISE COMPARADA DE UM AGREGADO DE ESCÓRIA DE ACIARIA COMO MATERIAL ALTERNATIVO PARA LASTRO DE VIAS FÉRREAS DO TIPO <i>HEAVY HAUL</i> POR MEIO DE ENSAIOS TRIAXIAIS	
Bruno Guimarães Delgado	
Antônio Viana da Fonseca	
Eduardo Fortunato	
Daniela Raquel Ferreira Coelho	
<b>DOI 10.22533/at.ed.3201925065</b>	

<b>CAPÍTULO 6</b> .....	<b>71</b>
CARACTERIZAÇÃO EM FADIGA POR FLEXÃO ROTATIVA DE FIOS DE ARAME DE SOLDA	
Ingrid Ariani Belineli Barbosa	
Heide Heloise Bernardi	
William Marcos Muniz Menezes	
<b>DOI 10.22533/at.ed.3201925066</b>	
<b>CAPÍTULO 7</b> .....	<b>80</b>
ESTUDO DA MICROESTRUTURA NA ZONA TERMICAMENTE AFETADA COM A VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM	
Luís Henrique Pires da Silva	
Alex Sander Chaves da Silva	
<b>DOI 10.22533/at.ed.3201925067</b>	
<b>CAPÍTULO 8</b> .....	<b>92</b>
ESTUDO DA USINAGEM DA SUPERLIGA A BASE DE FERRO-NÍQUEL UTILIZANDO FERRAMENTA CERÂMICA	
Eduardo Pires Bonhin	
Sarah David Müzel	
Marcel Yuzo Kondo	
Lúcia de Almeida Ribeiro	
José Vitor Candido de Souza	
Marcos Valério Ribeiro	
<b>DOI 10.22533/at.ed.3201925068</b>	
<b>CAPÍTULO 9</b> .....	<b>100</b>
CONSTRUÇÃO DE UMA MÁQUINA DE NÉVOA SALINA ATENDENDO AOS REQUISITOS MÍNIMOS CONTIDOS NAS NORMAS ISO 9227 e ASTM B-117	
Leonardo de Souza Coutinho	
Alexandre Alvarenga Palmeira	
<b>DOI 10.22533/at.ed.3201925069</b>	
<b>CAPÍTULO 10</b> .....	<b>111</b>
MECANIZAÇÃO AGRÍCOLA: COLHEITADEIRAS AXIAIS X RADIAIS	
Filipi José Arantes Lemos	
João Mario Mendes de Freitas	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32019250610</b>	
<b>CAPÍTULO 11</b> .....	<b>127</b>
MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA PARA O PROJETO DE MODELOS DE BIELAS E TIRANTES	
Jamile Maria Araujo Tavares	
Rejane Martins Fernandes Canha	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32019250611</b>	
<b>CAPÍTULO 12</b> .....	<b>142</b>
ESTUDO NUMÉRICO DE UM EQUIPAMENTO DE SECAGEM	
Eduardo Dal Piva Schuch	
Magaiver Gabriel Lamp	
Conrado Mendes Morais	
Ângela Beatrice Dewes Moura	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32019250612</b>	

<b>CAPÍTULO 13</b> .....	<b>153</b>
SISTEMA DE AQUECIMENTO DE ÁGUA A COMBUSTÃO DE GASOLINA	
Felipe Michael Grein	
Jean Lucas Pereira	
Luiz Felipe Weck	
Olaf Graupmann	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32019250613</b>	
<b>CAPÍTULO 14</b> .....	<b>156</b>
MODELAGEM DE PID PARA SISTEMA DE CONTROLE DE RAMPAS DE TEMPERATURA EM BRASSAGEM	
Gabriel Queiroz	
Marcelo Barros de Almeida	
Márcio Jose da Cunha	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32019250614</b>	
<b>CAPÍTULO 15</b> .....	<b>168</b>
MODELAGEM MATEMÁTICA DE SISTEMAS DINÂMICOS: UMA ABORDAGEM DIDÁTICA	
Lucas Divino Alves	
Neylor Makalister Ribeiro Vieira	
Emerson Paulino dos Reis	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32019250615</b>	
<b>CAPÍTULO 16</b> .....	<b>183</b>
APLICAÇÃO E ANÁLISE VIA MEC EM PROBLEMAS DE TERMOELASTICIDADE 2D	
Luis Vinicius Pereira Silva	
Gilberto Gomes	
João Carlos Barleta Uchôa	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32019250616</b>	
<b>CAPÍTULO 17</b> .....	<b>198</b>
SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA INJEÇÃO DE ÁGUA EM RESERVATÓRIO DE PETRÓLEO HETEROGÊNEO	
Raquel Oliveira Lima	
José Arthur Oliveira Santos	
Antônio Jorge Vasconcellos Garcia	
Felipe Barreiros Gomes	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32019250617</b>	
<b>CAPÍTULO 18</b> .....	<b>207</b>
TANQUES FLASH: DIMENSIONAMENTO E ANÁLISE DE CUSTOS NO SOFTWARE DE MODELAGEM E SIMULAÇÃO EMSO	
Erich Potrich	
Sérgio Correia da Silva	
Larissa Souza Amaral	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32019250618</b>	



<b>CAPÍTULO 19</b> .....	<b>215</b>
AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE DEPOSIÇÃO ORGÂNICA EM OPERAÇÕES DE MISTURA DE PETRÓLEOS NO TANQUE DE ESTOCAGEM EM REFINARIAS DE PETRÓLEO	
Rosberguer de Almeida Camargo	
Mauren Costa da Silva	
Rafael Beltrame	
Darci Alberto Gatto	
Antônio Carlos da Silva Ramos	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32019250619</b>	
<b>CAPÍTULO 20</b> .....	<b>223</b>
AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA EMBARCADO PARA MENSURAR A ILUMINÂNCIA EM UM AVIÁRIO EXPERIMENTAL	
Giovanni Polette Dalla Libera	
Victor Moreira Leão	
Vitor Augusto de Sousa	
Matheus Fernando Lima Zuccherelli de Souza	
Renata Lima Zuccherelli de Oliveira	
Marcelo Eduardo de Oliveira	
Adriano Rogério Bruno Tech	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32019250620</b>	
<b>CAPÍTULO 21</b> .....	<b>230</b>
CONTROLADOR FUZZY SINTONIZADO POR ALGORITMO GENÉTICO EM SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA	
Lenon Diniz Seixas	
Diego Solak Castanho	
Hugo Valadares Siqueira	
Fernanda Cristina Corrêa	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32019250621</b>	
<b>CAPÍTULO 22</b> .....	<b>243</b>
CONTROLADORES ROBUSTO APLICADO A CONVERSORES CC-CC	
Luiz Otávio Limurci dos Santos	
Luiz Antonio Maccari Junior	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32019250622</b>	
<b>CAPÍTULO 23</b> .....	<b>261</b>
PROPOSTA DE PLATAFORMA PARA ESTUDO DE MOTOR A RELUTÂNCIA VARIÁVEL 8/6	
Marcos José de Moraes Filho	
Luciano Coutinho Gomes	
Darizon Alves de Andrade	
Josemar Alves dos Santos Junior	
Wanberton Gabriel de Souza	
Cássio Alves de Oliveira	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32019250623</b>	

<b>CAPÍTULO 24</b> .....	<b>275</b>
ESTUDO COMPARATIVO DE MODELAGENS DE ENROLAMENTOS DE UM TRANSFORMADOR UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS PARA ANÁLISES DE ESFORÇOS ELETROME CÂNICOS	
Pedro Henrique Aquino Barra Arnaldo José Pereira Rosentino Junior Antônio Carlos Delaiba	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32019250624</b>	
<b>CAPÍTULO 25</b> .....	<b>287</b>
PROCEDIMENTO PARA AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DO LAÇO DE HISTERESE MAGNÉTICA	
Vitor Hörbe Pereira Da Costa Antônio Flavio Licarião Nogueira Leonardo José Amador Salas Maldonado	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32019250625</b>	
<b>CAPÍTULO 26</b> .....	<b>294</b>
SIMULAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO DE CAMPO E CORRENTE ELÉTRICA EM TECIDOS BIOLÓGICOS	
Guilherme Brasil Pintarelli Afrânio de Castro Antonio Jr. Raul Guedert Sandra Cossul Daniela Ota Hisayasu Suzuki	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32019250626</b>	
<b>CAPÍTULO 27</b> .....	<b>307</b>
SISTEMA DE PRESENÇA UTILIZANDO IDENTIFICAÇÃO POR RADIOFREQUÊNCIA	
Giovani Formaggio Mateus Ricardo Barroso Leite	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32019250627</b>	
<b>CAPÍTULO 28</b> .....	<b>322</b>
SISTEMAS DEFASADORES EM ALTA FREQUÊNCIA UTILIZANDO MICROFITA EM SUBSTRATO FR4	
Jobson De Araújo Nascimento José Moraes Gurgel Neto Alexsandro Aleixo Pereira da Silva Regina Maria de Lima Neta	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32019250628</b>	
<b>CAPÍTULO 29</b> .....	<b>333</b>
ANÁLISES DA RUPTURA EM TRECHO DA BR-060 NO MUNICÍPIO DE ALEXÂNIA, GOIÁS, E CONDIÇÕES APÓS SEIS ANOS DA RECUPERAÇÃO	
Rideci Farias Tiago Matias Lino Haroldo da Silva Paranhos Itamar de Souza Bezerra Ranieri Araújo Farias Dias Alexsandra Maiberg Hausser	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32019250629</b>	
<b>SOBRE O ORGANIZADOR</b> .....	<b>346</b>

## SIMULAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO DE CAMPO E CORRENTE ELÉTRICA EM TECIDOS BIOLÓGICOS

### **Guilherme Brasil Pintarelli**

Instituto de Engenharia Biomédica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina  
(ORCID 0000-0002-6920-0049)

### **Afrânio de Castro Antonio Jr.**

Instituto de Engenharia Biomédica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina  
(ORCID 0000-0002-8436-7736)

### **Raul Guedert**

Instituto de Engenharia Biomédica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina  
(ORCID 0000-0002-2466-5061)

### **Sandra Cossul**

Instituto de Engenharia Biomédica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina  
(ORCID 0000-0003-4839-9447)

### **Daniela Ota Hisayasu Suzuki**

Instituto de Engenharia Biomédica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina  
(ORCID 0000-0001-6373-1677)

**RESUMO:** As simulações de distribuição de campo e corrente elétrica em tecidos biológicos podem reduzir custos e tempos de pesquisas, e poupar vidas. Ainda assim, permitem prever eventos que ainda não aconteceram e otimizar

procedimentos clínicos, em função de diversas condições tecnicamente impostas. Nesse capítulo são abordados o processo de condução em meios biológicos, aplicações derivadas de indução de potencial transmembrana, modelagem matemática e exemplo de uso de simulações em áreas médicas. A abordagem do capítulo não envolve conhecimentos prévios em áreas de tecnologia ou saúde.

**PALAVRAS-CHAVES:** Campo Elétrico. Tecidos Vivos. Modelagem matemática. Simulação Matemática.

### SIMULATIONS OF ELECTRICAL FIELD AND ELECTRIC CURRENT DISTRIBUTION IN BIOLOGICAL TISSUES

**ABSTRACT:** Electrical field and current distribution simulations in biological tissues can reduce costs and research times and save lives. Nevertheless, they allow predicting events that have not yet occurred and optimising clinical procedures, depending on several technically imposed conditions. In this chapter, the biological conduction process, applications derived from transmembrane potential induction, mathematical modelling and an example of the use of simulations in medical areas is discussed. The chapter approach does not involve prior knowledge in areas of technology or health.

**KEYWORDS:** Electric field. Living tissues. Mathematical modeling. Mathematical simulation.

## 1 | INTRODUÇÃO

Nesse capítulo são abordados aspectos introdutórios de simulações de distribuição de campo e corrente elétrica em tecidos biológicos. Os tecidos biológicos podem possuir parâmetros complexos. Resolver a distribuição de campos e corrente elétrica pode ser de execução laboriosa quando aplicada a um tecido biológico e resolução analítica inviável. Por isso, faz-se necessário uso de recursos computacionais e métodos de simulação numérica.

Para explicação do tópico, serão utilizadas quatro subseções, na primeira será explicado os princípios de condução de correntes em meios biológicos, como se comportam campos elétricos e propriedades elétricas dos tecidos. Na segunda, os fenômenos de indução de potencial transmembrana e efeito joule, que por consecutiva explicam algumas das aplicações de campos elétricos em tecidos. Na terceira, a modelagem matemática. Por fim, serão exemplificadas aplicações, com ênfase em tratamentos por eletroporação.

## 2 | A CONDUÇÃO E CAMPO ELÉTRICO EM MEIOS BIOLÓGICOS

O campo elétrico é imposto pela distribuição de cargas elétricas, ou seja, gradiente de potencial elétrico, e possui natureza vetorial. Partículas eletricamente carregadas são sujeitas a forças quando localizadas em um campo elétrico. Em meios biológicos, é comum a existência de cargas iônicas. Os íons são moléculas ou átomos eletricamente carregados. Por exemplo,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{HPO}_4^{2-}$  e  $\text{SO}_4^{2-}$ . A orientação do fluxo iônico por condução é de acordo com o vetor campo elétrico, enquanto o sentido do fluxo depende da polaridade do íon. O fluxo de cátions é no sentido do campo elétrico, já o fluxo de ânions é oposto ao campo. A corrente de condução iônica é representada na Figura 1. Observe que o mecanismo de condução iônica é diferente dos materiais elétricos. Nestes materiais, o princípio de condução é por deslocamento de elétrons (GRIMNES; MARTINSEN, 2014).

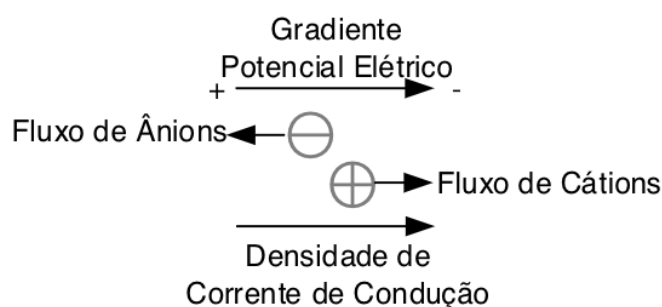


Figura 1 – Sentido de densidade de corrente por condução e deslocamento de cátions  $\oplus$  e

Além da corrente provocada por campo elétrico, pode existir uma corrente por difusão. Esta tem orientação e o sentido que segue a região de alta concentração para a região de baixa concentração de determinada partícula. Esse fenômeno é decorrência da tendência de homogeneização de concentração do sistema. O fluxo por difusão é em função do gradiente de concentração, que é descrito pela lei de Fick. Partículas carregadas resultam em densidade de corrente de difusão, como na Figura 2 – Sentido de densidade de corrente por difusão e fluxo de difusão (fluxo de cátions  $\oplus$ ) em função de gradiente de concentração.. O fenômeno de difusão também pode ocorrer para partículas não carregadas, nesse caso não há corrente de difusão. A difusão é fenômeno importante principalmente quando se estuda processos a nível celular.

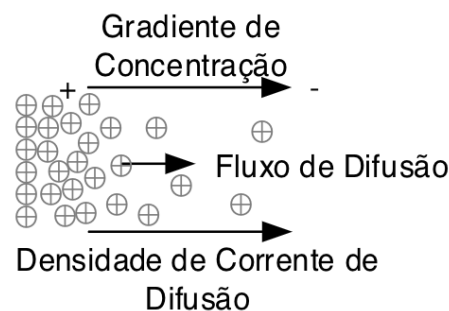


Figura 2 – Sentido de densidade de corrente por difusão e fluxo de difusão (fluxo de cátions  $\oplus$ ) em função de gradiente de concentração.

Materiais biológicos possuem características condutiva e capacitiva expressivas e geralmente são caracterizados em dois parâmetros. Que são a condutividade elétrica e a permissividade elétrica. A condutividade elétrica (representado por  $\sigma$ ) é proporcional a componente resistiva do material, e expressa a facilidade da passagem de correntes elétricas. Sua unidade no sistema internacional (SI) é Siemens por metro (S/m). A permissividade elétrica (representado por  $\epsilon$ ) explica como um meio se polariza em função de um campo elétrico, ou seja, a facilidade de formar um campo elétrico no meio iônico. Sua unidade no SI é Farad por metro (F/m). A distribuição do campo elétrico é em função de características elétricas do material e pode ser obtida com a solução da equação de Laplace, conforme equação (1). O vetor campo elétrico é obtido com a equação (2). Observa-se que as equações (1) e (2) são para uso em regime estático ou quase-estático.

$$-\nabla \cdot (\sigma \nabla V) = 0 \quad (1)$$

$$\vec{E} = -\nabla V \quad (2)$$

Onde a tensão é representada por  $V$ . Ressalva-se que  $\nabla$  é o operador divergente do cálculo vetorial e  $\nabla$  é o operador gradiente.

A completa descrição de como os campos elétricos e magnéticos existem, ou seja, como se distribuem, que configurações podem assumir e que fenômenos podem dar origem, é dada pelas equações de Maxwell (BASTOS, 2004; “Maxwells Equations”, 2018). Por exemplo, a lei de Ampère (equação (3)), relaciona o vetor campo elétrico com o de campo magnético.

$$\nabla \times \vec{H} = \sigma \vec{E} + \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (3)$$

Ressalva-se que  $\nabla \times$  é o operador rotacional do cálculo vetorial.

Os tecidos biológicos podem apresentar heterogeneidade, anisotropia e propriedades elétricas não lineares (*e.g.*, condutividade em função do campo elétrico e dispersões). Heterogeneidade é a característica de complexidade estrutural e anisotropia é a característica de propriedades físicas (como propriedades elétricas) variáveis com a direção. Essas características podem ocorrer devido a morfologia do tecido. As dispersões são alterações da permissividade em função da frequência (SCHWAN, 1957). O campo de estudo de caracterização de propriedades elétricas passivas de materiais biológicos é chamado de bioimpedância (GRIMNES; MARTINSEN, 2014).

### 3 | CAMPOS ELÉTRICOS APLICADOS AOS TECIDOS BIOLÓGICOS

As aplicações de campos elétricos em sistemas biológicos variam de acordo com o nível do sistema (corpo, órgãos, tecidos, células ou moléculas). Alguns grupos de aplicações são: manipulação cinética, estimulação de células excitáveis, eletropermeabilização de membranas e ablação térmica (ZIMMERMANN; NEIL, 1996).

A característica capacitiva da membrana celular é de interesse em fenômenos que necessitam de indução de potencial transmembrana em função de campo elétrico exógeno. Quando a célula é imersa em um campo elétrico os íons se aproximam da membrana celular (no meio extracelular e no meio intracelular). Ou seja, ocorre indução de potencial transmembrana. Esse processo é demonstrado na Figura 3 – Representação da indução de cargas elétricas (íons) na membrana celular devido campo elétrico externo. Em (a) uma célula está inserida entre eletrodos e não há campo elétrico aplicado. Em (b) a mesma célula está simplificada. Nesta todo o conteúdo intracelular foi modelado por cargas positivas e negativas (íons). Em (c) um campo elétrico externo é aplicado e ocorre deslocamento dessas cargas até a membrana celular, que é eletricamente isolante.. A aplicação de campos elétricos externos pode induzir potenciais transmembrana suficientes para provocar estimulação celular e

eletroporação (KOTNIK, 2016; KRASSOWSKA; NEU, 1994).

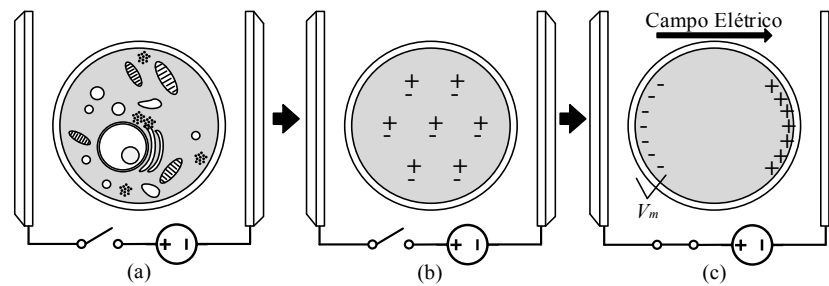


Figura 3 – Representação da indução de cargas elétricas (íons) na membrana celular devido campo elétrico externo. Em (a) uma célula está inserida entre eletrodos e não há campo elétrico aplicado. Em (b) a mesma célula está simplificada. Nesta todo o conteúdo intracelular foi modelado por cargas positivas e negativas (íons). Em (c) um campo elétrico externo é aplicado e ocorre deslocamento dessas cargas até a membrana celular, que é eletricamente isolante.

De maneira geral, na estimulação elétrica, objetiva-se respostas fisiológicas e integridade final da célula excitável. A estimulação elétrica é relevante em pesquisas e aplicações clínicas para corrigir arritmias cardíacas (VIANA *et al.*, 2016), transtornos e doenças neurológicas (SCHLENSTEDT *et al.*, 2017), alívio de dor (com uso ou não de técnicas de *Deep Brain Stimulation*, DBS) (LEVY; DEER; HENDERSON, 2010) e diagnóstico de disfunções neuromusculares (como polineuropatia diabética periférica) a partir da estimulação de nervos periféricos e sua resposta (COSSUL *et al.*, 2018).

A indução de potenciais transmembrana supra fisiológicos, possibilita realizar alterações na característica de seletividade da membrana da célula, fenômeno denominado eletroporação ou eletropermeabilização. Esse fenômeno pode ser realizado de maneira reversível ou irreversível. Essa técnica aprimora ou é mais eficiente que técnicas e métodos tradicionais. Por exemplo, na transferência genética, a eletroporação permite aplicação em maior gama de situações (diferentes níveis e características celulares) (IVORRA *et al.*, 2009); no tratamento de câncer, a eletroporação combinada com quimioterapia melhora qualidade do tratamento (GEHL *et al.*, 2018; SUZUKI; MARQUES; RANGEL, 2016) na pasteurização, a eletroporação permite conservar propriedades dos alimentos, que podem ser alteradas com pasteurização térmica (GOLBERG; FISCHER; RUBINSKY, 2010); e em extração de materiais intracelulares, a eletroporação permite extração em menores tempos (HABERL MEGLIC; MAROLT; MIKLAVCIC, 2015).

Observa-se que a indução de potencial transmembrana depende de características do campo aplicado, como intensidade e frequência (GRIMNES; MARTINSEN, 2014). Para fenômeno de indução de potencial transmembrana geralmente aplica-se campos pulsados com onda quadrada mono/bipolar e exponencial truncada mono/bipolar (BOTTER; MERLETTI, 2016; MARTY *et al.*, 2006; VIANA *et al.*, 2016).

A passagem de corrente elétrica em um material provoca geração de calor e seu aquecimento, no período da imposição de um campo elétrico. Esse fenômeno é explicado pela lei de Joule. Geralmente o efeito joule é compreendido como um

“efeito colateral” do campo elétrico. Porém, utiliza-se esse efeito em eletrocirurgia. A densidade elevada de corrente na extremidade do equipamento eletro cirúrgico, também chamado de bisturi elétrico, provoca destruição do tecido por desidratação ou vaporização. O fenômeno é utilizado principalmente para redução do tempo do corte cirúrgico e/ou coagular tecidos e vasos sanguíneos. Observa-se que nesse tipo de equipamento utiliza-se frequências de 300 kHz a 3 MHz (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013).

Ressalva-se que as aplicações de corrente elétrica em humanos ou outros animais deve-se atender a limites impostos por normas e legislações vigentes. Principalmente, limites em relação à segurança elétrica. Por exemplo, a ABNT NBR 60601 pode impor limites quanto à amplitude de campos elétricos, frequência, duração e correntes toleráveis em seres humanos (ABNT, 2016).

#### 4 | A MODELAGEM MATEMÁTICA

A modelagem matemática é um processo desenvolvido e utilizado em paralelo ao cálculo matemático, que serve para transcrever observações do mundo em funções matemáticas. A modelagem permite prever eventos que ainda não aconteceram ou que ainda não são completamente entendidos. Os modelos matemáticos estão presentes no cotidiano, por exemplo, em estimativa de tempo de viagem de carro e previsão climática. No primeiro caso, a modelagem contextualiza que um objeto (seu carro) está se deslocando no espaço em um determinado período de tempo, e é possível obter uma função (cálculo matemático) para descrever a duração da viagem. O motorista pode aprimorar seu modelo e acrescentar intervalos de descanso com base na duração total da viagem. No segundo caso, o modelo climático é de um sistema complexo, ele é alimentado por um conjunto de informações meteorológicas provenientes de diversas estações na terra (*e.g.*, vento, pressão, temperatura e umidade) e dados de satélite.

Independente do modelo, é possível estudar fenômenos que ainda não aconteceram. Esse fato dá o poder de realizar interferências apenas no modelo para prever o que irá acontecer em um ambiente real – a esse processo damos o nome de simulação. No exemplo do velocímetro do carro, é possível prever o horário de chegada baseado no limite de velocidade da via, mas também é possível simular casos em que o motorista dirige com velocidade inferior ou superior e acrescentando ou não paradas de descanso.

Devido à complexidade de alguns fenômenos, é bastante usual que os modelos matemáticos sejam específicos, transcrevendo muitas vezes apenas uma parcela de um fenômeno, ou, o transcrevendo sem considerar alguns aspectos. Por este motivo um modelo pode não ser exato, ou seja, o resultado prático não será idêntico ao modelado, mas sim estará dentro de um intervalo de confiança. Um bom modelo é aquele que representa uma determinada situação de maneira suficiente (quantidade de erros conhecida e adequada) e que pode ser computado em tempo adequado.



Por exemplo, um modelo de previsão do tempo para o dia seguinte não é adequado se ele demorar mais de 24 horas para ser computado (FISCHER, 2008; WOELKE; MURGUEITIO; PREISSNER, 2010).

Além de recursos do cálculo matemático, pode-se utilizar outros recursos para um modelo. Por exemplo, o modelo de Hodgkin-Huxley utiliza a teoria de circuitos elétricos (HODGKIN; HUXLEY, 1952). Nele, são modelados os processos de ativação e propagação dos potenciais de ação de neurônios. Nota-se que esse processo é um fenômeno bioquímico, mas pode ser modelado considerando que as variações biológicas e químicas das células correspondem a variações em um circuito elétrico. Como o modelo se propõe a analisar taxas de variações, matematicamente isso pode ser transcrito por equações diferenciais, neste caso, por quatro equações diferenciais ordinárias não-lineares. Os coeficientes utilizados são obtidos através de experimentos práticos, método que também pode ser utilizado para validar o modelo proposto (HAEFNER, 2005).

Geralmente os modelos matemáticos que descrevem a distribuição de campo e corrente elétrica em um tecido não são adequados ao método de cálculo analítico, portanto, é necessário a resolução numérica. Um tecido pode ser dividido em unidade infinitesimais. Para um modelo ser compatível a um computador é necessário processo de discretização. Ou seja, divisão do tecido, para fins de cálculo, em partes finitas. O método de elementos finitos é um procedimento utilizado para discretização. O resultado dessa divisão recebe o nome de malha. Na Figura 4 – Malhas geradas por um software de simulação. (a) Malha com menos elementos finitos. (b) Malha com mais elementos finitos e, portanto, maior resolução. é mostrado exemplos de duas malhas geradas por um software de simulação. Nota-se que quanto maiores os elementos da malha, maior será o erro associado a simulação, visto que a resolução do problema será tratada de forma cada vez mais genérica. Por outro lado, malhas muito finas (com muitos elementos), embora aumentem o grau de resolução da simulação, também aumentam a complexidade computacional, pois mais cálculos deverão ser realizados. Pode-se associar a resolução de uma malha à pixels de uma fotografia ou vídeo. Uma fotografia de menor resolução demanda menos recursos computacionais. Uma fotografia com maior resolução demanda mais recursos computacionais.

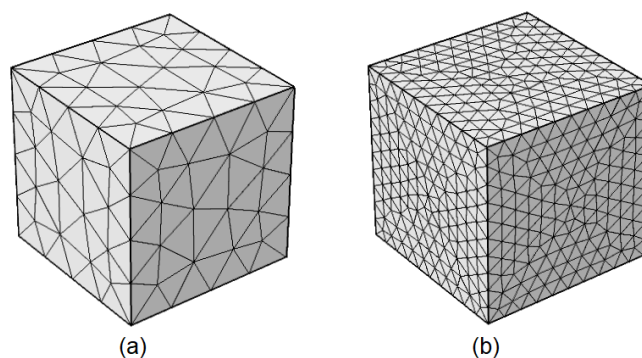


Figura 4 – Malhas geradas por um software de simulação. (a) Malha com menos elementos finitos. (b) Malha com mais elementos finitos e, portanto, maior resolução.

As dimensões das malhas utilizadas dependem da aplicação. Uma simulação de elementos grandes, como a variação térmica em peças de motores, pode não necessitar de resoluções micrométricas. Em um estudo de simulação de uma célula, pode ser necessário resolução na ordem de nanômetros.

Durante a resolução numérica pode-se aplicar métodos numéricos iterativos. Estes operam com varreduras de possibilidades e convergência para resultados possíveis. Um dos métodos de iteração é o de Newton, onde o software realiza progressivos cálculos para o mesmo ponto, atribuindo possíveis respostas e buscando a convergência para o melhor resultado, interrompendo a busca ao encontrar um valor com um erro menor que o limiar desejado.

Embora os resultados de simulações contenham erros associados (*e.g.*, erros da modelagem, resolução da malha e de resolução numérica), os resultados computacionais e experimentais costumam ser próximos. É possível prever com pequenos desvios resultados práticos em um ambiente computacional, o que permite estudar e compreender como um fenômeno reage a diversos estímulos. É comum o uso de softwares integrados e especializados para construção do modelo, geração da malha e solução numérica.

## 5 | APLICAÇÃO EM ELETROPORAÇÃO

Quando o tecido é submetido a campos suficientemente intensos, a membrana celular sofre alterações que resultam na abertura de poros (potenciais transmembrana supra fisiológicos), que aumentam a permeabilidade celular. Essas alterações podem apresentar duas características, dependendo da intensidade do campo aplicado. Na eletroporação reversível, a célula aumenta sua permeabilidade momentaneamente, mas ainda é capaz de retornar ao seu estado inicial. Já na eletroporação irreversível, as mudanças na membrana são tão intensas que a célula perde sua capacidade de retornar ao estado inicial, conseqüentemente morrendo pela perda da homeostase e desbalanceamento osmótico, visto que sua permeabilidade é permanentemente alterada (IVORRA, 2010).

Entre as diversas aplicações para eletroporação, destaca-se a possibilidade de auxiliar o tratamento de câncer por quimioterapia em uma técnica denominada eletroquimioterapia. Nela, utiliza-se a eletroporação reversível para aumentar a citotoxicidade dos fármacos quimioterápicos, acelerando o processo de inserção destes em meio intracelular, isto é, aplica-se o quimioterápico na massa tumoral em conjunto com a eletroporação, que aumenta a permeabilidade celular e atua como um “catalisador” do fármaco no sentido do transporte entre a membrana (Okino & Hitoshi, 1987).

A principal vantagem da técnica é que, como a eletroporação utilizada é reversível, ela não será responsável pela morte celular, mantendo os benefícios de seletividade dos tratamentos quimioterápicos. Dessa forma, são reduzidos o tempo de tratamento e dosagem de medicamentos (e efeitos colaterais) (MARTY *et al.*, 2006). Por outro lado, há desafios de implementação, uma vez que no tratamento todo o volume do tumor deve ser contemplado por campos elétricos adequados, nem sempre havendo alterações visuais instantâneas no tecido.

As simulações computacionais são uma ferramenta essencial para o pré-tratamento da eletroquimioterapia, neste objetiva-se simular o volume de eletroporação através da distribuição de campos elétricos e estudar se o protocolo é suficiente para atingir todo o tumor. Nesse caso, os parâmetros como tensão aplicada e configuração dos eletrodos podem ser otimizados para o tratamento. Como a eletroporação altera as membranas celulares, ela altera também as características elétricas do tecido. Por causa disso, os modelos utilizados para esse tipo de simulação consideram que as características elétricas do tecido (*e.g.*, condutividade) são alteradas em função do campo elétrico aplicado e eletroporação (SEL *et al.*, 2005). As figuras 5 e 6 representam o processo de avaliação, reconstrução computacional e resultado das simulações para diferentes casos, as setas indicam áreas onde a margem de segurança é muito pequena e representam situações de risco (campo elétrico inadequado).

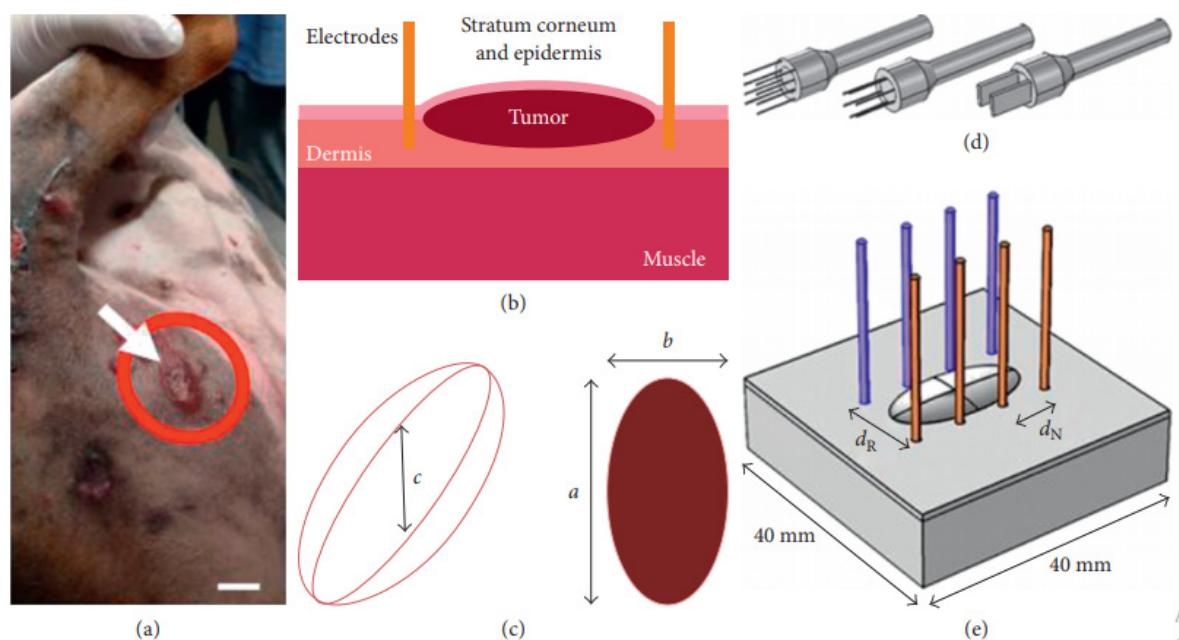


Figura 5 – Caso prático de eletroquimioterapia. (a) Tumor superficial diagnosticado em um cachorro. (b) Esquemático bidimensional do tumor e tecidos adjacentes. (c) Esquemático das dimensões tumorais. (d) Eletrodos disponíveis no mercado. (e) Reconstrução em software de simulação do caso apresentado para uma configuração de eletrodos. Fonte: José Alvim Berkenbrock, Rafaela Grecco Machado, and Daniela Ota Hisayasu Suzuki, “Electrochemotherapy Effectiveness Loss due to Electric Field Indentation between Needle Electrodes: A Numerical Study,” *Journal of Healthcare Engineering*, vol. 2018, Article ID 6024635, 8 pages, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/6024635>.

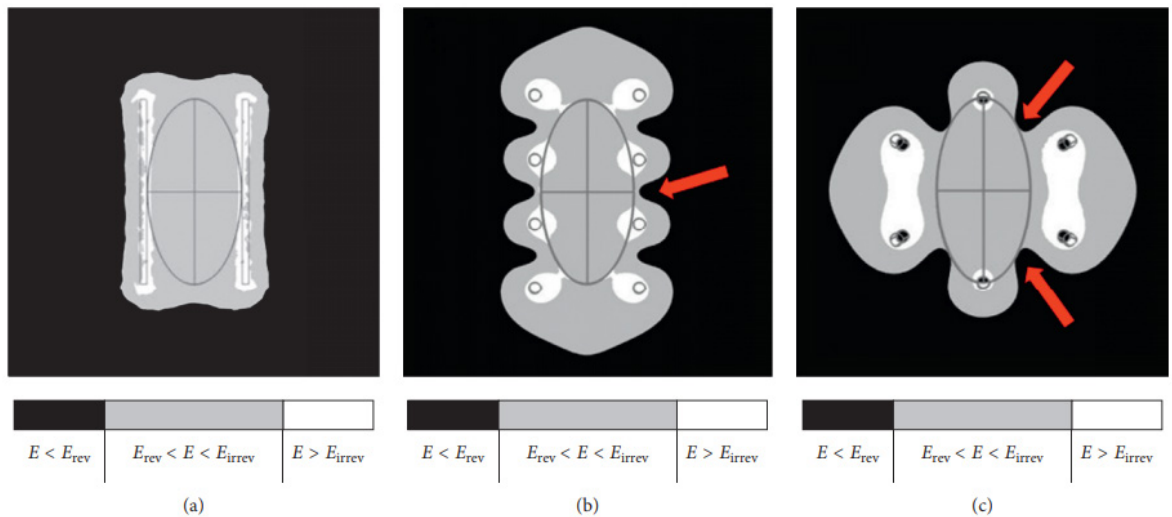


Figura 6 – Resultados das simulações para três casos. (a) Utilizando placas paralelas. (b) Utilizando uma configuração de agulhas em paralelo. (c) Utilizando uma configuração de agulhas hexagonais. Fonte: Adaptado José Alvim Berkenbrock, Rafaela Grecco Machado, and Daniela Ota Hisayasu Suzuki, “Electrochemotherapy Effectiveness Loss due to Electric Field Indentation between Needle Electrodes: A Numerical Study,” *Journal of Healthcare Engineering*, vol. 2018, Article ID 6024635, 8 pages, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/6024635>.

Aplicação de eletroporação retratada nesse capítulo exemplifica o pré-tratamento de câncer em tecido animal *in vivo*. Neste caso as simulações indicam caminhos adequados e inadequados para o tratamento sem experimentações exaustivas em tecido vivo. Todavia, as experimentações em tecido vivo são necessárias para construção do modelo. Uma vez construído, o modelo pode ser utilizado para diversos tratamentos. Isso mostra possibilidade de poupar recursos e tempo de centros de pesquisa e empresas.

A economia de recursos também é possível em casos que o experimento prático envolve destruição mecânica da amostra, necessita de infraestrutura com grandes dimensões e/ou características não encontradas facilmente na natureza (*e.g.*, condições de pressão e temperatura), ou a própria amostra é de alto custo (*e.g.*, desenvolvimento de embarcações). Em áreas de experimentação biológica, o uso de simulações pode reduzir ou substituir a quantidade de animais necessários para um determinado estudo, pois resultados preliminares já podem ser obtidos no ambiente de simulação (JONES; GARDNER; WATSON, 2009); como também, em casos que não há possibilidade de ensaio prático, a simulação pode informar a solução com maior chance de sucesso (SUZUKI *et al.*, 2015, 2017).

As aplicações de simulações de campos elétricos e seus efeitos são em estimulação elétrica (*e.g.*, de tecido neural (OPITZ *et al.*, 2015) e muscular (KOCBACH; MOHN; BRIX, 2011; ZEIGHAMI; ALIZADEH; SAVIZ, 2019)), ablação não térmica (SANO *et al.*, 2016) electrode exposure lengths, and tissue types. A vegetable (potato e tratamentos por eletroporação em geral (GARCIA; DAVALOS; MIKLAVCIC, 2014; RITTER *et al.*, 2018).

Observa-se que nesse capítulo foram abordadas situações de fenômenos em

baixa frequência, ou seja, campos estáticos ou quasi-estáticos, ambos não ionizantes. Em algumas aplicações utiliza-se espectros de frequência superiores. Por exemplo, em simulações para taxa de absorção específica (*Specific Absorption Rate*, SAR) e de campos eletromagnéticos ionizantes. Esse valor indica quanto de potência pode ser absorvido por um tecido biológico vivo. Equipamentos com tecnologias sem fio e equipamentos médicos podem ser sujeitos à esse tipo de regulação (CHABALKO; SHAHMOHAMMADI; SAMPLE, 2017). Além da física elétrica, os modelos podem comportar física mecânica, termodinâmica e acústica (MAKAROV *et al.*, 2017).

## REFERÊNCIAS

ABNT. **NBR IEC 60601-1:2010 Emenda 1:2016**. Rio de Janeiro: [s.n.].

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR IEC 60601-2-2**, 2013.

BASTOS, J. P. A. **Eletromagnetismo para Engenharia: Estática e Quase-Estática**. Florianópolis, SC: Editora da UFSC, 2004.

BOTTER, A.; MERLETTI, R. EMG of Electrically Stimulated Muscles. In: **Surface Electromyography : Physiology, Engineering, and Applications**. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2016. p. 311–332.

CHABALKO, M. J.; SHAHMOHAMMADI, M.; SAMPLE, A. P. Quasistatic Cavity Resonance for Ubiquitous Wireless Power Transfer. **PLOS ONE**, v. 12, n. 2, p. e0169045, 15 fev. 2017.

COSSUL, S.; FAVRETTO, M. A.; ANDREIS, F. R.; IWATA, D. N. R.; MARQUES, J. L. B. Proposta de um Sistema para Estudos de Condução Nervosa. Uberlândia, 2018,

FISCHER, H. P. Mathematical modeling of complex biological systems: from parts lists to understanding systems behavior. **Alcohol research & health : the journal of the National Institute on Alcohol Abuse and Alcoholism**, v. 31, n. 1, p. 49–59, 2008.

GARCIA, P. A.; DAVALOS, R. V.; MIKLAVCIC, D. A Numerical Investigation of the Electric and Thermal Cell Kill Distributions in Electroporation-Based Therapies in Tissue. **PLoS ONE**, v. 9, n. 8, p. e103083, 12 ago. 2014.

GEHL, J.; SERSA, G.; MATTHIESSEN, L. W.; MUIR, T.; SODEN, D.; OCCHINI, A.; QUAGLINO, P.; CURATOLO, P.; CAMPANA, L. G.; KUNTE, C.; CLOVER, A. J. P.; BERTINO, G.; FARRICHA, V.; ODILI, J.; DAHLSTROM, K.; BENAZZO, M.; MIR, L. M. Updated standard operating procedures for electrochemotherapy of cutaneous tumours and skin metastases. **Acta Oncologica**, v. 0, n. 0, p. 1–9, 25 mar. 2018.

GOLBERG, A.; FISCHER, J.; RUBINSKY, B. The Use of Irreversible Electroporation in Food Preservation. In: [s.l.]: Springer Berlin Heidelberg, 2010. p. 273–312.

GRIMNES, S.; MARTINSEN, O. G. **Bioimpedance and Bioelectricity Basics**. 3rd. ed. [s.l.]: Academic Press, 2014.

HABERL MEGLIC, S.; MAROLT, T.; MIKLAVCIC, D. Protein Extraction by Means of Electroporation from *E. coli* with Preserved Viability. **The Journal of Membrane Biology**, v. 248, n. 5, p. 893–901, 23 out. 2015.

- HAEFNER, J. W. **Modeling Biological Systems**. New York: Springer-Verlag, 2005.
- HODGKIN, A. L.; HUXLEY, A. F. A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve. **The Journal of physiology**, v. 117, n. 4, p. 500–44, 15 ago. 1952.
- IVORRA, A. Tissue Electroporation as a Bioelectric Phenomenon: Basic Concepts. In: RUBINSKY, B. (Ed.). **Irreversible Electroporation**. [s.l.]: Springer, Berlin, Heidelberg, 2010. p. 23–61.
- IVORRA, A.; AL-SAKERE, B.; RUBINSKY, B.; MIR, L. M. In vivo electrical conductivity measurements during and after tumor electroporation: conductivity changes reflect the treatment outcome. **Physics in Medicine and Biology**, v. 54, n. 19, p. 5949–5963, 7 out. 2009.
- JONES, H. M.; GARDNER, I. B.; WATSON, K. J. Modelling and PBPK Simulation in Drug Discovery. **The AAPS Journal**, v. 11, n. 1, p. 155–166, 2009.
- KOCBACH, J.; MOHN, L.; BRIX, O. A Simulation Approach to Optimizing Performance of Equipment for Thermostimulation of Muscle Tissue using COMSOL Multiphysics. **Biophysics & Bioeng. Letters**, v. 4, n. 2, p. 9–33, 2011.
- KOTNIK, T. Transmembrane Voltage Induced by Applied Electric Fields. In: **Handbook of Electroporation**. Cham: Springer International Publishing, 2016. p. 1–17.
- KRASSOWSKA, W.; NEU, J. C. Response of a single cell to an external electric field. **Biophysical Journal**, v. 66, n. 6, p. 1768–1776, jun. 1994.
- LEVY, R.; DEER, T. R.; HENDERSON, J. Intracranial neurostimulation for pain control: a review. **Pain physician**, v. 13, n. 2, p. 157–65, 2010.
- MAKAROV, S. N.; NOETSCHER, G. M.; YANAMADALA, J.; PIAZZA, M. W.; LOUIE, S.; PROKOP, A.; NAZARIAN, A.; NUMMENMAA, A. Virtual Human Models for Electromagnetic Studies and Their Applications. **IEEE Reviews in Biomedical Engineering**, v. 10, n. c, p. 95–121, 2017.
- MARTY, M.; SERSA, G.; GARBAY, J. R.; GEHL, J.; COLLINS, C. G.; SNOJ, M.; BILLARD, V.; GEERTSEN, P. F.; LARKIN, J. O.; MIKLAVCIC, D.; PAVLOVIC, I.; PAULIN-KOSIR, S. M.; CEMAZAR, M.; MORSLI, N.; SODEN, D. M.; RUDOLF, Z.; ROBERT, C.; O’SULLIVAN, G. C.; MIR, L. M. Electrochemotherapy – An easy, highly effective and safe treatment of cutaneous and subcutaneous metastases: Results of ESOPE (European Standard Operating Procedures of Electrochemotherapy) study. **European Journal of Cancer Supplements**, v. 4, n. 11, p. 3–13, nov. 2006.
- Maxwells Equations**. Disponível em: <maxwells-equations.com>.
- OKINO, M.; MOHRI, H. Effects of a high-voltage electrical impulse and an anticancer drug on in vivo growing tumors. **Japanese journal of cancer research : Gann**, v. 78, n. 12, p. 1319–21, dez. 1987.
- OPITZ, A.; PAULUS, W.; WILL, S.; ANTUNES, A.; THIELSCHER, A. Determinants of the electric field during transcranial direct current stimulation. **NeuroImage**, v. 109, p. 140–150, abr. 2015.
- RITTER, A.; BRUNERS, P.; ISFORT, P.; BARABASCH, A.; PFEFFER, J.; SCHMITZ, J.; PEDERSOLI, F.; BAUMANN, M. Electroporation of the Liver: More Than 2 Concurrently Active, Curved Electrodes Allow New Concepts for Irreversible Electroporation and Electrochemotherapy. **Technology in Cancer Research & Treatment**, v. 17, p. 153303381880999, 9 jan. 2018.
- SANO, M. B.; FAN, R. E.; HWANG, G. L.; SONN, G. A.; XING, L. Production of Spherical Ablations Using Nonthermal Irreversible Electroporation: A Laboratory Investigation Using a Single Electrode and Grounding Pad. **Journal of Vascular and Interventional Radiology**, v. 27, n. 9, p. 1432–1440.e3, set. 2016.

- SCHLENSTEDT, C.; SHALASH, A.; MUTHURAMAN, M.; FALK, D.; WITT, K.; DEUSCHL, G. Effect of high-frequency subthalamic neurostimulation on gait and freezing of gait in Parkinson's disease: a systematic review and meta-analysis. **European Journal of Neurology**, v. 24, n. 1, p. 18–26, 1 jan. 2017.
- SCHWAN, H. P. Electrical Properties of Tissue and Cell Suspensions. In: [s.l.: s.n.]. p. 147–209.
- SEL, D.; CUKJATI, D.; BATIUSKAITE, D.; SLIVNIK, T.; MIR, L. M.; MIKLAVCIC, D. Sequential Finite Element Model of Tissue Electropermeabilization. **IEEE Transactions on Biomedical Engineering**, v. 52, n. 5, p. 816–827, maio 2005.
- SUZUKI, D. O. H.; ANSELMO, J.; DE OLIVEIRA, K. D.; FREYTAG, J. O.; RANGEL, M. M. M.; MARQUES, J. L. B.; RAMOS, A. Numerical Model of Dog Mast Cell Tumor Treated by Electrochemotherapy. **Artificial Organs**, v. 39, n. 2, p. 192–197, fev. 2015.
- SUZUKI, D. O. H.; BERKENBROCK, J. A.; DE OLIVEIRA, K. D.; FREYTAG, J. O.; RANGEL, M. M. M. Novel application for electrochemotherapy: Immersion of nasal cavity in dog. **Artificial Organs**, v. 41, n. 8, p. 767–773, 1 ago. 2017.
- SUZUKI, D. O. H.; MARQUES, C. M. G.; RANGEL, M. M. M. Conductive Gel Increases the Small Tumor Treatment With Electrochemotherapy Using Needle Electrodes. **Artificial Organs**, v. 40, n. 7, p. 705–711, jul. 2016.
- VIANA, M. A.; BASSANI, R. A.; PETRUCCI, O.; MARQUES, D. A.; BASSANI, J. W. M. System for open-chest, multidirectional electrical defibrillation. **Research on Biomedical Engineering**, v. 32, n. 1, p. 74–84, 12 abr. 2016.
- WOELKE, A. L.; MURGUEITIO, M. S.; PREISSNER, R. Theoretical Modeling Techniques and Their Impact on Tumor Immunology. **Clinical and Developmental Immunology**, v. 2010, n. May 2014, p. 1–11, 2010.
- ZEIGHAMI, A.; ALIZADEH, F.; SAVIZ, M. Optimal currents for electrical stimulation of bone fracture repair: A computational analysis including variations in frequency, tissue properties, and fracture morphology. **Bioelectromagnetics**, v. 40, n. 2, p. 128–135, fev. 2019.
- ZIMMERMANN, U.; NEIL, G. A. **Electromanipulation of cells**. [s.l.]: CRC Press, 1996.

Agência Brasileira do ISBN  
ISBN 978-85-7247-432-0

