

# Energia Solar e Eólica 2

Paulo Jayme Pereira Abdala  
(Organizador)

 **Atena**  
Editora

Ano 2019

**Paulo Jayme Pereira Abdala**  
(Organizador)

# Energia Solar e Eólica 2

Atena Editora  
2019

2019 by Atena Editora

Copyright © da Atena Editora

Editora Chefe: Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Diagramação e Edição de Arte: Geraldo Alves e Karine de Lima

Revisão: Os autores

#### Conselho Editorial

- Prof. Dr. Alan Mario Zuffo – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul  
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  
Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa  
Prof. Dr. Constantino Ribeiro de Oliveira Junior – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Profª Drª Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná  
Prof. Dr. Darllan Collins da Cunha e Silva – Universidade Estadual Paulista  
Profª Drª Deusilene Souza Vieira Dall’Acqua – Universidade Federal de Rondônia  
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul  
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria  
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná  
Profª Drª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia  
Profª Drª Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionele delle Figlie de Maria Ausiliatrice  
Profª Drª Juliane Sant’Ana Bento – Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense  
Prof. Dr. Jorge González Aguilera – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul  
Profª Drª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins  
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão  
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará  
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista  
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará  
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas  
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande  
Profª Drª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

#### Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)

E56 Energia solar e eólica 2 [recurso eletrônico] / Organizador Paulo Jayme Pereira Abdala. – Ponta Grossa (PR): Atena Editora, 2019. – (Energia Solar e Eólica; v. 2)

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

ISBN 978-85-7247-067-4

DOI 10.22533/at.ed.674192201

1. Energia – Fontes alternativas. 2. Energia eólica. 3. Energia solar. I. Abdala, Paulo Jayme Pereira.

CDD 621.042

**Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422**

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

2019

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.

[www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)

## APRESENTAÇÃO

As chamadas energias renováveis, também conhecidas como energias alternativas ou ainda energias limpas são três denominações possíveis para qualquer forma de energia obtida por meio de fontes renováveis, e que não produzem grandes impactos ambientais negativos. Atualmente, com a grande preocupação mundial em compensar as emissões de CO<sub>2</sub>, o consumo deste tipo de energia tem sido o foco de governos e empresas em todo globo.

Neste sentido, o Brasil possui uma matriz energética bastante limpa, onde predomina o uso de hidrelétricas, apesar do crescimento do uso de termelétricas, as quais são abastecidas por combustível fóssil. No Brasil, o setor energético é responsável por grande parte das emissões de CO<sub>2</sub>, ficando atrás somente do setor agrícola que reapresenta a maior contribuição para o efeito estufa brasileiro.

A energia proveniente do sol é a alternativa renovável mais promissora para o futuro e, por este motivo tem recebido maior atenção e também mais investimentos. A radiação solar gratuita fornecida pelo sol pode ser captada por placas fotovoltaicas e ser posteriormente convertida em energia elétrica. Esses painéis usualmente estão localizados em construções, como indústrias e casas, o que proporciona impactos ambientais mínimos. Esse tipo de energia é uma das mais fáceis de ser implantada em larga escala. Além de beneficiar os consumidores com a redução na conta de energia elétrica reduzem as emissões de CO<sub>2</sub>.

Com relação à energia eólica, o Brasil faz parte do grupo dos dez países mais importantes do mundo para investimentos no setor. As emissões de CO<sub>2</sub> requeridas para operar esta fonte de energia alternativa são extremamente baixas e é uma opção atrativa para o país não ser dependente apenas das hidrelétricas. Os investimentos em parques eólicos vem se tornando uma ótima opção para neutralização de carbono emitidos por empresas, indústrias e etc.

Neste contexto, este EBOOK apresenta uma importante contribuição no sentido de atualizar os profissionais que trabalham no setor energético com informações extremamente relevantes. Ele está dividido em dois volumes contendo artigos práticos e teóricos importantes para quem deseja informações sobre o estado da arte acerca do assunto.

Paulo Jayme Pereira Abdala

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>10</b>
ESTUDO DA VIABILIDADE ECONÔMICA PARA A INSTALAÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS NOS CAMPI IFG ITUMBIARA E URUAÇU	
Sergio Batista da Silva Olívio Carlos Nascimento Souto Fernando Nunes Belchior Ghunter Paulo Viajante Elias Barbosa Macedo Vera Ferreira Souza	
<b>DOI 10.22533/at.ed.6741922011</b>	
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>24</b>
ESTUDO DE VIABILIDADE PARA IMPLEMENTAÇÃO DE UMA PLANTA FOTOVOLTAICA INTEGRADA EM UM SHOPPING CENTER DE FORTALEZA - CE	
Sofia da Costa Barreto Paulo Cesar Marques de Carvalho	
<b>DOI 10.22533/at.ed.6741922012</b>	
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	<b>41</b>
ESTUDO DO COMPORTAMENTO E QUALIDADE FÍSICO-QUÍMICA DO ABACAXI SECADO EM SECADOR HÍBRIDO SOLAR-ELÉTRICO	
Raphaella Soares da Silva Camelo Juliana Lobo Paes Milena Araujo Silva Madelon Rodrigues Sá Braz Dhiego Santos Cordeiro da Silva Camila Lucas Guimarães	
<b>DOI 10.22533/at.ed.6741922013</b>	
<b>CAPÍTULO 4</b> .....	<b>54</b>
ESTUDOS TEÓRICOS E EXPERIMENTAIS SOBRE O CUINSE <sub>2</sub> E SUA APLICAÇÃO EM DISPOSITIVOS FOTOVOLTAICOS	
Yuri Hamayano Lopes Ribeiro Denis Gilbert Francis David Marcus Vinícius Santos da Silva Jailton Souza de Almeida	
<b>DOI 10.22533/at.ed.6741922014</b>	
<b>CAPÍTULO 5</b> .....	<b>66</b>
EXPERIÊNCIA DE CURSO GRATUITO DE INSTALADOR DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE OFERECIDO PELO IFTO CAMPUS PALMAS	
Claudio Silva dos Santos Abimael Ribeiro Martins Adail Pereira Carvalho Brunno Henrique Brito	
<b>DOI 10.22533/at.ed.6741922015</b>	
<b>CAPÍTULO 6</b> .....	<b>78</b>
IMPACTO DA LEI PALMAS SOLAR NA ANÁLISE FINANCEIRA DA MICROGERAÇÃO FOTOVOLTAICA EM PALMAS - TO	
Isamara Quirino de Castro Carlos Brunno Henrique Brito	

Felipe Tozzi Bittencourt  
DOI 10.22533/at.ed.6741922016

**CAPÍTULO 7 ..... 91**

IMPACTOS DOS INCENTIVOS DOS GOVERNOS DO ESTADO E DO MUNICÍPIO NA MICROGERAÇÃO SOLAR FOTOVOLTAICA EM PALMAS - TO

Allan Carlos do Nascimento Silva  
Brunno Henrique Brito

DOI 10.22533/at.ed.6741922017

**CAPÍTULO 8 ..... 104**

IMPLANTAÇÃO E AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE DOIS GERADORES FOTOVOLTAICOS CONECTADOS DIRETAMENTE NO BARRAMENTO C.C. DO LABORATÓRIO DE SISTEMAS HÍBRIDOS/MINIRREDES (GEDAE/UFPA)

Jorge Augusto Leal Corrêa  
Claudomiro Fábio de Oliveira Barbosa  
Marcos André Barros Galhardo  
João Paulo Alves Veríssimo  
Israel Hidai Lobato Lemos  
Edinaldo José da Silva Pereira  
João Tavares Pinho

DOI 10.22533/at.ed.6741922018

**CAPÍTULO 9 ..... 121**

INFLUÊNCIA DA SUJEIRA NA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA

Elismar Ramos Barbosa  
Merlim dos Santos Ferreira de Faria  
Fabio de Brito Gontijo

DOI 10.22533/at.ed.6741922019

**CAPÍTULO 10 ..... 132**

INFLUÊNCIA DO ESPECTRO SOLAR EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS SOB CÉU LIMPO, CÉU PARCIALMENTE NUBLADO E CÉU NUBLADO

Guilherme Marques Neves  
Waldeir Amaral Vilela  
Enio Bueno Pereira  
Luiz Angelo Berni

DOI 10.22533/at.ed.67419220110

**CAPÍTULO 11 ..... 146**

INTENSIFICAÇÃO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM COLETOR SOLAR DE PLACA PLANA ATRAVÉS DE GERADOR DE VÓRTICE LONGITUDINAL DO TIPO DELTA

Felipe Augusto Santos da Silva  
Leandro Oliveira Salviano

DOI 10.22533/at.ed.67419220111

**CAPÍTULO 12 ..... 161**

METODOLOGIA COMPUTACIONAL DE CONTROLE DE QUALIDADE DE DADOS DE IRRADIÂNCIA SOLAR

Marcus Vinícius Contes Calça  
Matheus Rodrigues Raniero  
Alexandre Dal Pai  
Carlos Roberto Pereira Padovani  
Domingos Mario Zeca Fernando

**CAPÍTULO 13 ..... 174**

PROJETO DE SISTEMA FOTOVOLTAICO PARA ABRIGOS DE PONTOS DE ÔNIBUS NA AV. ALMIRANTE BARROSO – BELÉM/PA

Ana Laura Pinheiro Ruivo Monteiro  
Edinaldo José da Silva Pereira  
Everton Leandro Santos Amaral  
Ítalo de Sousa  
Magda Tayane Abraão de Brito

**DOI 10.22533/at.ed.67419220113**

**CAPÍTULO 14 ..... 191**

PROJETO PRELIMINAR DE UM RADIÔMETRO ABSOLUTO PARA MEDIR A IRRADIÂNCIA SOLAR TOTAL

Franciele Carlesso  
Jenny Marcela Rodriguez Gomez  
Luiz Angelo Berni  
Graziela da Silva Savonov  
Luis Eduardo Antunes Vieira  
Waldeir Amaral Vilela  
Edson Luiz de Miranda

**DOI 10.22533/at.ed.67419220114**

**CAPÍTULO 15 ..... 200**

PROJETO, DESENVOLVIMENTO E TESTE DE FOGÕES SOLARES

Diego Lopes Coriolano  
Erico Diogo Lima da Silva  
Iraí Tadeu Ferreira de Resende  
Vanina Cardoso Viana Andrade  
Denilson Pereira Gonçalves  
Renan Tavares Figueiredo  
Odésia Leonor Sanchez de Alsina

**DOI 10.22533/at.ed.67419220115**

**CAPÍTULO 16 ..... 213**

PROPOSTA DE RETROFIT NO SISTEMA DE ILUMINAÇÃO E ESTUDO DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA EM UM DOS BLOCOS DA UTFPR EM CURITIBA

Larissa Barbosa Krasnhak  
Jair Urbanetz Junior

**DOI 10.22533/at.ed.67419220116**

**CAPÍTULO 17 ..... 229**

PROPOSTA DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO PARA OTIMIZAÇÃO DO GASTO PÚBLICO COM O CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA DE UMA UNIDADE DE ENSINO FEDERAL IMPLANTADA NA REGIÃO DO VALE DO SÃO FRANCISCO

Adriano Moraes da Silva  
Rebeca Lorena Santos Maia e Silva  
Danielle Bandeira de Mello Delgado

**DOI 10.22533/at.ed.67419220117**

**CAPÍTULO 18 ..... 246**

PLATAFORMA PORTÁTIL E DE BAIXO CUSTO PARA A AQUISIÇÃO DA CURVA CARACTERÍSTICA

DE CÉLULAS SOLARES FOTOVOLTAICAS

Júlio César Madureira Silva  
Augusto César da Silva Bezerra  
Claudinei Rezende Calado  
Ana Luiza F. Maia  
Amanda Ribeiro Amorim

**DOI 10.22533/at.ed.67419220118**

**CAPÍTULO 19 ..... 255**

SISTEMA DE AQUISIÇÃO PARA PAINÉIS FOTOVOLTAICOS COM ARMAZENAMENTO DE DADOS EM SERVIDOR REMOTO UTILIZANDO PLATAFORMAS OPEN SOURCE RASPBERRY PI E ARDUINO

José Ilton de Oliveira Filho  
Wilk Coelho Maia

**DOI 10.22533/at.ed.67419220119**

**CAPÍTULO 20 ..... 263**

SUJIDADE DEPOSITADA SOBRE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS INSTALADOS EM GOIÂNIA: MORFOLOGIA E COMPOSIÇÃO QUÍMICA

Pedro Victor Valadares Romanholo  
Bernardo Pinheiro de Alvarenga  
Enes Gonçalves Marra  
Sérgio Pires Pimentel

**DOI 10.22533/at.ed.67419220120**

**CAPÍTULO 21 ..... 275**

TRATAMENTO E ANÁLISE DE DADOS SOLARIMÉTRICOS DA ESTAÇÃO METEOROLÓGICA DA EMC/UFG

Jéssica Alice Alves da Silva  
Bernardo Pinheiro de Alvarenga  
Sérgio Pires Pimentel  
Enes Gonçalves Marra

**DOI 10.22533/at.ed.67419220121**

**CAPÍTULO 22 ..... 290**

TESTES DE SENSIBILIDADE PARA DIFERENTES PARAMETRIZAÇÕES CUMULUS DO MODELO WRF PARA MELHORAR AS ESTIMATIVAS DE VENTO

Lucia Iracema Chipponelli Pinto  
Francisco Jose Lopes de Lima  
Fernando Ramos Martins  
Enio Bueno Pereira

**DOI 10.22533/at.ed.67419220122**

**CAPÍTULO 23 ..... 303**

O ENSINO SOBRE ENERGIAS RENOVÁVEIS NOS CURSOS DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA NAS UNIVERSIDADES BRASILEIRAS

André Barra Neto  
Ana Paula Pinheiro Zago  
Márcia Helena da Silva  
Mirian Sousa Moreira  
José Eduardo Ferreira Lopes

**DOI 10.22533/at.ed.67419220123**

<b>CAPÍTULO 24</b> .....	<b>317</b>
POTENCIALIDADE DO BIOGÁS GERADO PELA CODIGESTÃO ENTRE DEJETO BOVINO E SUÍNO	
<ul style="list-style-type: none"> <li>Juliana Lobo Paes</li> <li>Camila Ferreira Matos</li> <li>Gabriel Araújo e Silva Ferraz</li> <li>Giancarlo Bruggianesi</li> <li>Camila Kelly de Queiroz</li> <li>Caroline Stephanie Gomes de Castro Soares</li> </ul>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.67419220124</b>	
<b>CAPÍTULO 25</b> .....	<b>333</b>
SIMULAÇÃO DE UMA PLANTA OTEC DE CICLO FECHADO OPERANDO NO BRASIL	
<ul style="list-style-type: none"> <li>Marcus Godolphim de Castro Neves</li> <li>Hélio Henrique Rivabene Ferreira Dias</li> <li>Cassio Roberto Macedo Maia</li> <li>Ricardo Alan Verdú Ramos</li> </ul>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.67419220125</b>	
<b>CAPÍTULO 26</b> .....	<b>344</b>
ANÁLISE DA PRODUÇÃO DE 24 MESES DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE NO ESTADO DO TOCANTINS	
<ul style="list-style-type: none"> <li>Brunno Henrique Brito</li> <li>Thálisson Câmara Belém</li> <li>Márcio Serafim de Almeida</li> <li>Felipe Tozzi Bittencourt</li> </ul>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.67419220126</b>	
<b>CAPÍTULO 27</b> .....	<b>359</b>
ESTUDO TECNOLÓGICO DE SISTEMAS DE CULTIVO DE MICROALGAS	
<ul style="list-style-type: none"> <li>Robson de Souza Santiago</li> <li>Bruno Lindbergh Sousa</li> <li>Yordanka Reyes Cruz</li> <li>Estevão Freire</li> <li>Suely Pereira Freitas</li> <li>Gisel Chenard Díaz</li> </ul>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.67419220127</b>	
<b>CAPÍTULO 28</b> .....	<b>376</b>
INFLUÊNCIA DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS EM AEROPORTOS SOBRE A SEGURANÇA DAS OPERAÇÕES AERONÁUTICAS	
<ul style="list-style-type: none"> <li>Francisco Wilson Falcão Júnior</li> <li>Paulo Cesar Marques de Carvalho</li> <li>Wilson Cabral de Sousa Júnior</li> </ul>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.67419220128</b>	
<b>SOBRE O ORGANIZADOR</b> .....	<b>390</b>

## SIMULAÇÃO DE UMA PLANTA OTEC DE CICLO FECHADO OPERANDO NO BRASIL

### **Marcus Godolphim de Castro Neves**

Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”

Ilha Solteira – São Paulo

### **Hélio Henrique Rivabene Ferreira Dias**

Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”

Ilha Solteira – São Paulo

### **Cassio Roberto Macedo Maia**

Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”

Ilha Solteira – São Paulo

### **Ricardo Alan Verdú Ramos**

Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”

Ilha Solteira – São Paulo

**RESUMO:** Atualmente, a busca por novas fontes de energias renováveis tem sido o motivo de pesquisas e investimentos, sendo que a possibilidade de exploração da energia dos oceanos pode ser uma interessante alternativa. Um desses processos é baseado na extração da energia térmica solar acumulada na superfície dos oceanos. Parte dessa energia pode ser transformada em eletricidade e em vários outros subprodutos por meio de um processo conhecido como Conversão da Energia Térmica dos Oceanos (OTEC), que utiliza a diferença de temperatura da água entre a superfície e

a profundidade de 1.000 m. As usinas OTEC podem operar em sistemas térmicos abertos, fechados ou híbridos, sendo que, para operar de forma adequada, o local de instalação da usina OTEC deve ter águas com temperatura média da superfície maior que 24°C. O Brasil possui várias regiões que atendem esta condição sendo, portanto, um dos países com boa capacidade de instalação de usina OTEC para ajudar a suprir sua demanda energética. Diante deste contexto, este trabalho apresenta a simulação numérica da operação de uma planta OTEC de ciclo térmico fechado no litoral brasileiro, utilizando parâmetros encontrados na literatura, mostrando que esse tipo de usina é capaz de exportar em torno de 14 MW, sendo uma boa alternativa de substituição de termelétricas a gás ou combustíveis fósseis.

**PALAVRAS-CHAVE:** Energia, Oceano, OTEC

**ABSTRACT:** The searching for news sources of clean and renewable energy has been the reason of a lot of researches and investments and the seas are a good alternative to explore. The oceans have, at least, four means of energy generation; being one of them is using the solar thermal energy accumulated in their surfaces. Per day, the oceans accumulates thermal energy equivalent to 250 million of oil barrels and this energy can be converted to into electricity and various byproducts by means a process named

Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC). OTEC plants operate in three distinct thermal cycles: open, closed and hybrid. For operating at adequate form, the local of installation of an OTEC plant must have the sea surface temperature average greater than 24 °C. Brazil have a lot of locals in its offshore line with sea surface temperature average equal or greater than this temperature, being one of the countries with good capacity to install an OTEC plant to attempt electrical and energetic demands. Therefore, this work aims the computational simulation of operation of a closed thermal cycles of an OTEC plant in the Brazilian offshore line, using the parameters found in literature, showing that this kind of plant is able to export 14 MW, being an interesting alternative to replace diesel stationary engines.

## 1 | INTRODUÇÃO

Segundo projeções do Plano Nacional de Energia 2030, elaborado pelo Ministério de Minas e Energia (2007), o Brasil deverá atingir 47% de utilização de fontes renováveis em sua matriz energética. Algumas fontes renováveis alternativas têm começado a se tornarem importantes nos últimos anos, como, por exemplo, geração eólica e a fotovoltaica.

Por outro lado, por ter um vasto litoral, o Brasil também pode aproveitar de forma significativa o potencial energético que os oceanos podem oferecer. Existem várias formas de aproveitamento da energia (cinética, química ou térmica) dos oceanos em eletricidade, podendo ser por meio das marés, das correntes oceânicas, das ondas, do gradiente de salinidade (osmose) e da conversão da energia térmica do oceano (Eletronorte, 2013).

Os oceanos são grandes acumuladores de energia solar em suas superfícies, podendo, em áreas tropicais, atingir o equivalente a 250 milhões de barris de petróleo por dia. Esta energia térmica acumulada pode ser convertida em energia elétrica por meio de um processo denominado Conversão da Energia Térmica do Oceano, comumente conhecida pela sigla OTEC, originada de Ocean Thermal Energy Conversion (Etemadi et al., 2011).

As vantagens da geração de eletricidade por este processo é que são que os recursos da OTEC são vastos, naturalmente renováveis e não poluentes. Adicionalmente, essa tecnologia produz diversos subprodutos, como água fresca para consumo e irrigação; alimentos marinhos para indústrias, sal e água gelada; dentre outros (Crews, 1997). Um sistema OTEC de 100 MWe pode reduzir uma quantidade de emissões de CO<sub>2</sub> em 140.000 toneladas por ano, se comparada com uma usina termelétrica de mesma capacidade (Tahara, Horiuchi e Kojima, 1995).

No entanto, existem algumas desvantagens da geração de eletricidade numa planta OTEC, sendo que dentre eles podem ser destacados os seguintes: baixa eficiência na conversão de energia, necessidade de um investimento inicial alto (entre

50 e 100 milhões de dólares para construir uma planta com capacidade de 10 MWe), custos de energia entre US\$0,13/kWh e US\$0,65/kWh (Upshaw, 2012).

De acordo com Etemadi et al. (2011), uma planta OTEC trabalha com a diferença de temperatura entre a água da superfície do oceano e a água localizada em um ponto a 1.000 m de profundidade. Em áreas tropicais, este gradiente de temperatura é em torno de 20 °C. Essa diferença ocorre porque a água do mar se torna fria conforme a profundidade aumenta (Reis e Souza, 2007).

A Figura 1 mostra como um sistema OTEC gera seus subprodutos e a Figura 2 mostra a variação da temperatura da água do oceano de acordo com a profundidade.

Embora as usinas OTEC possam operar em ciclos aberto, fechado ou híbrido, neste trabalho os estudos serão concentrados no ciclo fechado, cujo esquema típico simplificado é mostrado na Figura 3.

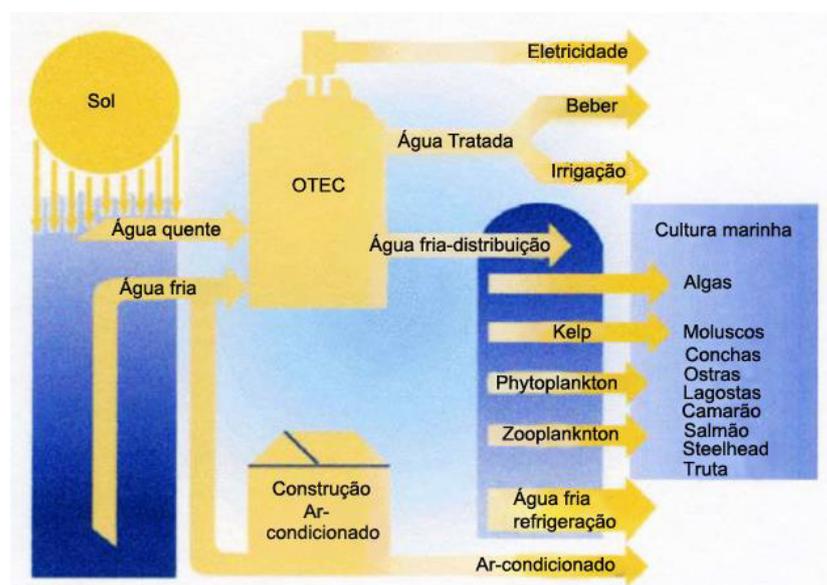


Figura 1 - Como uma usina OTEC gera os subprodutos (Adaptado de <http://www.nrel.gov>)

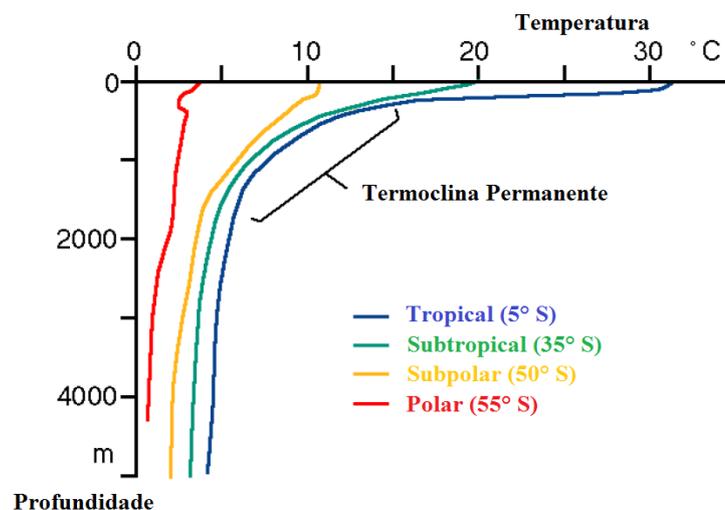
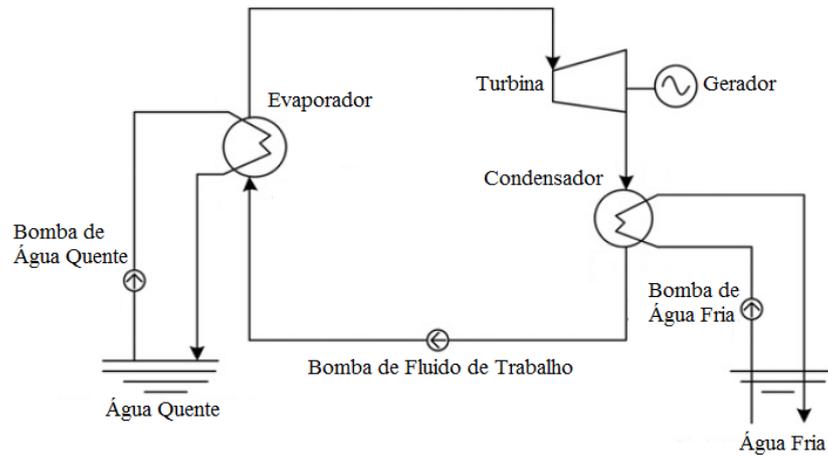


Figura 2 - Estrutura termal típica das águas dos oceanos (Reis e Souza, 2007)

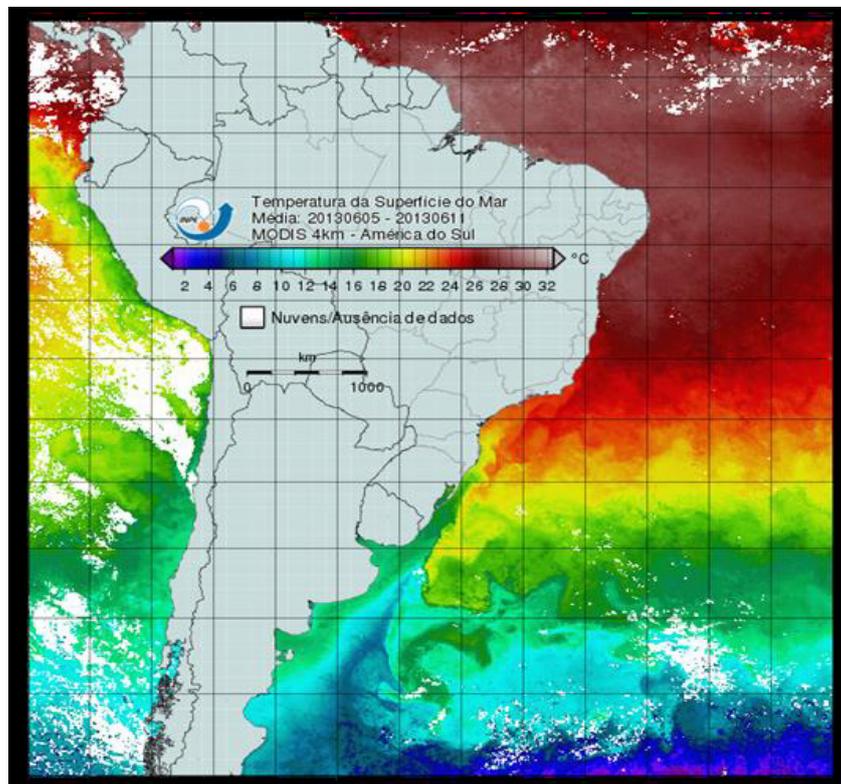


**Figura 3** - Ciclo fechado de uma planta OTEC (Faizal e Ahmed, 2013)

O ciclo fechado produz eletricidade por meio do ciclo de Rankine. O fluido de trabalho é um fluido com baixa temperatura de ebulição, sendo que o mais utilizado é a amônia, sendo que Bharathan (2012) também recomenda estudar a utilização do propileno. O ciclo de Rankine de uma OTEC consiste em dois trocadores de calor, uma turbina a vapor e uma bomba. A água quente obtida na superfície é bombeada para o trocador de calor e, então, o fluido de trabalho aumenta sua temperatura até mudar de estado para o de vapor superaquecido. O vapor produzido aciona uma turbina de baixa pressão (Upshaw, 2012) e, após sair da turbina, como vapor com título, vai para o condensador, onde troca calor com a água fria da profundidade tornando-se líquido, sendo depois bombeado novamente para o evaporador (Faizal e Ahmed, 2013).

Para aumentar a geração de energia elétrica num ciclo fechado pode ser adicionado um outro estágio. Cada estágio é um outro ciclo fechado, onde a saída de água quente do primeiro estágio alimenta o evaporador do segundo estágio e a água gelada entra no condensador do segundo estágio e sua saída alimenta o condensador do primeiro estágio, fazendo o caminho oposto da água quente (Upshaw, 2012).

Na Figura 4 é mostrada a média da temperatura da superfície da água da costa brasileira nos quatro meses do verão de 2013.



**Figura 4** - Temperatura da superfície das águas na costa brasileira no verão (<http://satellite.cptec.inpe.br>)

É possível observar que a temperatura da costa do nordeste brasileiro é em torno de 28 °C, o que sugere que este é um local que possui um bom potencial para instalação de uma usina OTEC, pois, segundo Nihous (2007), a média da temperatura da água da superfície deve ser acima de 24 °C para um bom aproveitamento do gradiente térmico dos oceanos.

## 2 | DESCRIÇÃO DO CASO ESTUDADO

O caso simulado trata-se de uma planta OTEC de ciclo fechado e com um estágio, como pode ser observado na Figura 5. Trata-se de um ciclo Rankine com turbina, bomba, pré-aquecedor, evaporador, superaquecedor, condensador e resfriador, sendo que o fluido de trabalho é a amônia. O trocador de calor possui uma bomba para alimentação de água da superfície e de profundidade. O aquecedor, superaquecedor e resfriador foram adicionados para aumentar a eficiência do condensador e do evaporador, porque a diferença de temperatura entre os dois fluidos (amônia e água) é muito baixo e a quantidade de calor é alta.

Deste modo, foi necessário um trocador de calor maior e mais eficiente. O coeficiente global de troca de calor para o condensador, evaporador e outros trocadores de calor foram adotados de acordo com Upshaw (2012), Uehara et al. (2009) e Avery e Hu (1994), estando entre 3,5 kW/m<sup>2</sup>K e 4,5 kW/m<sup>2</sup>K. A eficiência das bombas e turbina foram obtidas com base em dados de Upshaw (2012) e Bharathan (2011).

A simulação foi feita usando o programa EES® - Engineering Equation Solver (Klein e Alvarado, 1995), definindo as condições da costa brasileira e as equações termodinâmicas foram resolvidas, sendo que os parâmetros usados na simulação são mostrados na Tabela 1.

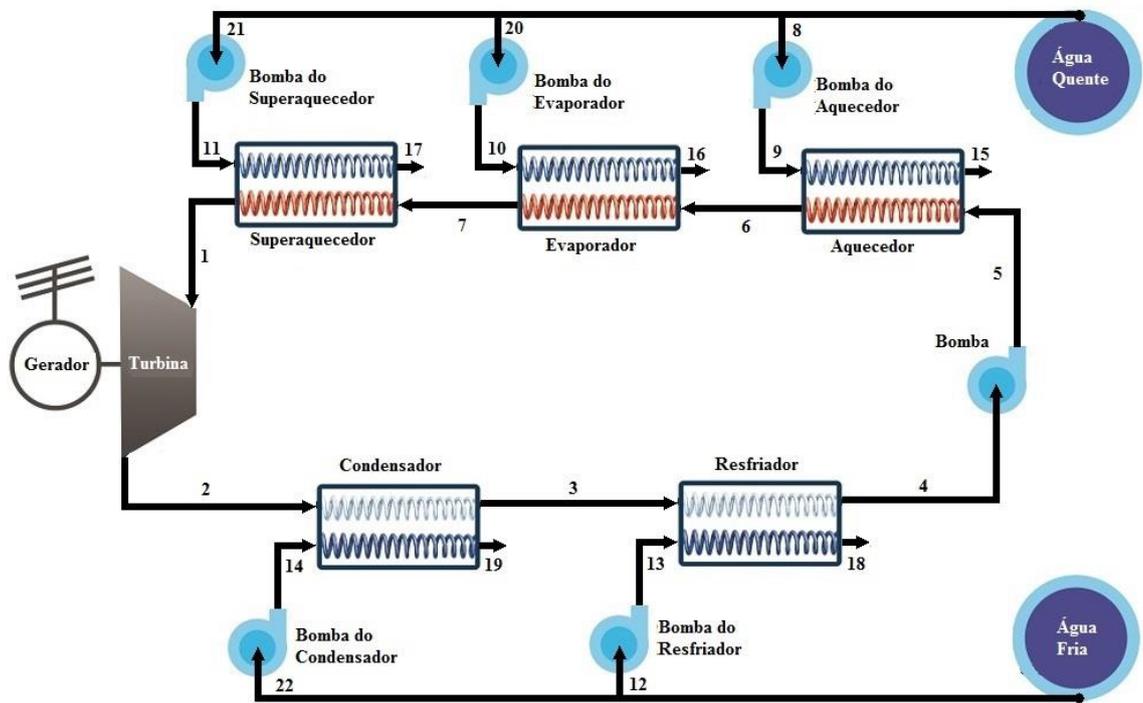


Figura 5 - Planta OTEC simulada

Parâmetro	Valor
Temperatura da água quente (°C)	26
Temperatura da água fria (°C)	4,5
Eficiência da bomba (%)	85
Eficiência da turbina (%)	85
Coeficiente global de transferência de calor (evaporador e condensador) (kW/m²K)	4,25
Coeficiente global de transferência de calor (outros trocadores de calor) (kW/m²K)	3,75
Eficiência do gerador elétrico (%)	98
Perda de carga no aquecedor (bar)	0,048
Perda de carga no evaporador (bar)	0,108
Perda de carga no superaquecedor (bar)	0,162
Perda de carga no condensador (bar)	0,086
Perda de carga no resfriador (bar)	0,119

Tabela 1 - Parâmetros utilizados na simulação da OTEC

### 3 | 3. METODOLOGIA

Considerando o processo em regime permanente e assumindo que todas as variações de energias cinética e potencial são desprezíveis, bem como a conservação

da massa, a primeira e a segunda lei da termodinâmica para um volume de controle são representadas da seguinte forma simplificada (Van Wylen, Borgnakke e Sonntag, 1994):

$$\sum \dot{m}_e - \sum \dot{m}_s = 0 \quad (1)$$

$$\dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc} + \sum \dot{m}_e h_e - \sum \dot{m}_s h_s = 0 \quad (2)$$

$$\dot{S}_{ger,vc} + \sum \frac{\dot{Q}_{vc,j}}{T_j} \sum \dot{m}_e s_e - \sum \dot{m}_s s_s = 0 \quad (3)$$

Onde:

$\dot{m}_e$  é a vazão mássica de entrada no volume de controle [kg/s];

$\dot{m}_s$  é a vazão mássica de saída do volume de controle [kg/s];

$\dot{Q}_{vc}$  é o fluxo de calor [kW];

$\dot{W}_{vc}$  é a potência gerada ou consumida pelo volume de controle [kW];

$h_e$  é a entalpia do fluido na entrada do volume de controle [kJ/kg];

$h_s$  é a entalpia do fluido na saída do volume de controle [kJ/kg];

$\dot{S}_{ger,vc}$  é o fluxo de entropia gerada no volume de controle [kW/ K];

$s_e$  é a entropia do fluido na entrada do volume de controle [kJ/kg K];

$s_s$  é a entropia do fluido na saída do volume de controle [kJ/kg K];

T é a temperatura [K].

A análise energética é capaz de levar em conta a qualidade da energia e as fontes de irreversibilidade no processo, sendo necessária a utilização da análise exergética. De acordo com Bejan, Tsatsaronis e Moran (1996), a exergia específica total é composta pela exergia física e química:

$$\bar{e}x_{total} = \bar{e}x_{fis} + \bar{e}x_{qui} \quad (4)$$

Onde:

$\bar{e}x_{total}$ : exergia molar total [kJ/kg mol];

$\bar{e}x_{fis}$ : exergia molar física [kJ/kg mol];

$\bar{e}x_{qui}$ : exergia molar química [kJ/kg mol].

Uma vez que o ciclo OTEC não possui combustível e desconsiderando os efeitos das energias cinética e potencial, a exergia física de um escoamento é avaliada baseada em um estado de equilíbrio restrito do sistema em um ambiente padrão ou estado morto (P0, T0), por meio de:

$$\bar{e}x_{fis} = (\bar{h} - \bar{h}_0) - T_0(\bar{s} - \bar{s}_0) \quad (5)$$

Onde:

$\bar{h}_0$ : entalpia do estado morto [kJ/kg mol];

$\bar{s}_0$ : entropia do estado morto [kJ/kgK mol].

A eficiência global da planta OTEC baseada na Primeira Lei da Termodinâmica é a razão da energia disponível (seja ela térmica ou elétrica) para exportação e da potência fornecida, de acordo com:

$$\eta_{overall} = \frac{\sum \dot{W}_o - \sum \dot{W}_i}{\sum \dot{Q}_i} \quad (6)$$

Onde:

$\eta_{overall}$ : eficiência global do ciclo [%];

$\dot{W}_o$ : potência que sai do ciclo [kW];

$\dot{W}_i$ : potência que entra no ciclo [kW];

$\dot{Q}_i$ : fluxo de calor que entra no ciclo [kW].

A eficiência de Carnot é um bom parâmetro para verificação de como a planta OTEC possui uma eficiência baixa, porém se comparado à eficiência de Carnot com a eficiência global, pode-se observar que a planta OTEC possui uma eficiência global acima de 50% da sua eficiência máxima. A eficiência de Carnot pode ser calculada por:

$$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_f}{T_q} \quad (7)$$

Onde:

$\eta_{Carnot}$ : eficiência de Carnot [%];

$T_f$ : menor temperatura do ciclo [K];

$T_q$ : maior temperatura do ciclo [K].

## 4 | 7. RESULTADOS

A Tabela 2 mostra os dados de pressão, temperatura, fluxo de massa e de algumas propriedades termodinâmicas obtidos através da simulação no EES®.

Ponto	$P$ (bar)	$T$ (°C)	$h$ (kJ/kg)	$s$ (kJ/kg K)	$\dot{m}$ (kg/s)	$ex$ (kJ/kg)
1	8,86	22,0	1.483,88	5,374	300	303,306
2	5,44	6,5	1.432,30	5,407	300	241,887
3	5,44	6,5	230,20	1,109	300	321,236
4	5,44	6,0	227,90	1,100	300	321,619
5	8,86	6,1	228,50	1,101	300	321,921
6	8,86	21,0	298,50	1,345	300	319,173
7	8,86	21,0	1.480,84	5,364	300	303,248
8	1,01	26,0	109,00	0,381	1,751	0,026
9	1,06	26,0	109,03	0,381	1,751	0,056
10	1,12	26,0	109,04	0,381	29,548	0,066

11	1,17	26,0	109,05	0,381	76	0,076
12	1,01	4,5	19,02	0,069	174	3,069
13	1,13	4,5	19,03	0,069	174	3,079
14	1,10	4,5	19,03	0,069	90,157	3,079
15	1,01	231	96,95	0,340	1,751	0,200
16	1,01	23,0	96,47	0,339	29,548	0,018
17	1,01	23,0	96,45	0,339	76	0,088
18	1,01	5,48	23,13	0,083	174	3,005
19	1,01	5,52	23,32	0,084	90,157	2,896
20	1,01	26,0	109,00	0,381	29,548	0,026
21	1,01	26,0	109,00	0,381	76	0,026
22	1,01	4,5	19,02	0,069	90,157	3,069

**Tabela 2** - Resultados termodinâmicos obtidos na simulação no EES®

A eficiência do ciclo foi de 4,06% e a eficiência de Carnot foi de 6,68%. Neste caso, a eficiência global é de 60% da eficiência de Carnot.

A potência produzida pela turbina, consumida pelas bombas e a disponível para exportação são mostradas na Tabela 3.

Equipamento	Potência (kWe)
Turbina	15.472,8
Bomba de fluido de serviço	191,0
Bomba do aquecedor	9,8
Bomba do evaporador	366,0
Bomba do superaquecedor	1,4
Bomba do condensador	893,5
Bomba do resfriador	2,4
Disponibilidade para exportação	14.740,7

**Tabela 3** - Potência requerida para cada equipamento

## 5 | CONCLUSÕES

Com os resultados obtidos nas simulações, é possível perceber que uma planta OTEC de ciclo fechado pode ser usada para gerar energia elétrica no nordeste do Brasil. Mesmo que a planta possua uma baixa eficiência energética, ela pode gerar consideráveis quantidades de energia. Essa quantidade é suficiente para substituir uma planta que funciona com motores estacionários a diesel, por exemplo, os quais possuem um custo de geração de energia comparativamente mais alto do que outras fontes de energia no Brasil.

Com a capacidade de exportação de 14 MW de energia, a planta OTEC se mostrou uma boa alternativa para substituição de fontes de energia altamente

poluidoras e caras, como o diesel. Para confirmar o potencial de implantação, será estudado o custo de produção da energia e sua viabilidade econômica. Além disso, outros ciclos serão simulados no futuro. A ideia é implementar concentradores solares no ciclo fechado, a fim de se observar o aumento da potência gerada e da eficiência.

## 6 | AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao CNPq por conceder bolsas de mestrados aos dois primeiros autores.

## REFERÊNCIAS

Avery, W. H., Hu, C., 1994. **Renewable Energy from the Ocean: A Guide to OTEC**. Oxford University Press

Bejan, A.; Tsatsaronis, G.; Moran, M., 1996. **Thermal design & optimization**. New York: John Wiley & Sons, 542 p.

Bharathan, D., 2011. **Staging Rankine cycles using ammonia for OTEC power production**. National Renewable Energy Laboratory. Technical Report NREL/TP-5500-49121, <<http://www.nrel.gov/docs/fy11osti/49121.pdf>>, 18 p.

Crews, R., 1997. **OTEC Sites**:  
[http://www.trellis.demon.co.uk/reports/otec\\_sites.html](http://www.trellis.demon.co.uk/reports/otec_sites.html). Acesso em: 18 Jan. 2013.

Eletronorte (Brasil). Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas. Introdução às Energias Renováveis. Disponível em: <<http://pt.scribd.com/doc/64299782/Introducao-as-Energias-Renovaveis-Apostila-Eletronorte>>. Acesso em: 23 Out. 2013.

Etemadi, A., Emdadi, A., AsefAfshar, O., Emami, Y., 2011. **Electricity generation by the ocean thermal energy**. Energy Procedia. vol.12, pp. 936-944.

Faizal, M., Ahmed, M. R., 2013. **Experimental studies on a closed cycle demonstration OTEC plant working on small temperature difference**. Renewable Energy. vol. 51, pp. 234-240.

Klein, S. A.; Alvarado, F. L., 1995. **EES - Engineering Equation Solver**. Middleton: F-Chart Software.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Plano nacional de energia 2030** / Ministério de Minas e Energia; colaboração Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME- EPE, 2007. 226 p.

Nihous, G., 2007. **An estimate of atlantic ocean thermal energy conversion (OTEC) resources**. Ocean Engineering, vol. 34, n. 17-18, pp. 2210-2221, 2007.

Reis, R. A. N., Souza, R. B., 2012. **Climatologia da estrutura termal do oceano Atlântico sudoeste a partir de dados observacionais de XBTS**. Scientific Initiation Final Relatory, CRS/INPE - MCTI, Santa Maria, RS, 7 p.

Tahara, K., Horiuchi, K., Kojima, T., 1995. **Ocean thermal energy conversion (OTEC) system as a countermeasure for CO2 problem - Energy balance and CO2 reduction potential**. Energy Conversion and Management, vol. 36, n. 6-9, pp. 857-860.

Uehara, H., Kusuda, H., Monde, M., Nakaoka, T., Sumitomo, H., 2009. **Shell-and-plate-type heat**

**exchangers for OTEC plants.** Journal of Solar Energy Engineering vol. 106, n. 3, pp. 286-290.

Upshaw, C. R., 2012. **Thermodynamic and economic feasibility analysis of a 20 mw ocean thermal energy conversion (OTEC) power plant.** Master Degree Dissertation, The University of Texas at Austin.

Van Wylen, G. J., Borgnakke, C., Sonntag, R. E., 2003. **Fundamentos da termodinâmica clássica.** 4 ed. São Paulo: Edgard Blücher, 589 p.

## **SOBRE O ORGANIZADOR:**

**Paulo Jayme Pereira Abdala** possui graduação em Engenharia Eletrônica pelo Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca - RJ (1988), mestrado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (2005) e pós-graduação em Gestão de Aviação Civil pela Universidade de Brasília (2003). Entre 1989 e 2008 foi Chefe do Laboratório de Ruído Aeronáutico e Emissões de Motores do DAC/ANAC, tendo desenvolvido centenas de estudos sobre poluição sonora e atmosférica oriundas da atividade aeronáutica. Foi representante oficial do Brasil em diversos Fóruns Internacionais sobre meio ambiente promovidos pela Organização de Aviação Civil Internacional OACI - Agência da ONU. Foi Coordenador dos Cursos de Engenharia de Produção, Elétrica, Civil e Mecânica na UNOPAR/PG entre 2013 e 2018. Atualmente é Consultor Independente para a AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL, OACI e INFRAERO. Tem experiência na área de Engenharia Eletrônica, atuando principalmente nos seguintes temas: acústica, meio ambiente e pedagogia (metodologia TRAINAIR/OACI).

Agência Brasileira do ISBN  
ISBN 978-85-7247-067-4



9 788572 470674