

# ENERGIA EÓLICA

fundamentos, tecnologia e aplicações

*CONSELHO EDITORIAL*

André Costa e Silva

Cecilia Consolo

Dijon de Moraes

Jarbas Vargas Nascimento

Luis Barbosa Cortez

Marco Aurélio Cremasco

Rogério Lerner

ÂNGELO VIAN  
CARLOS MARCIO VIEIRA TAHAN  
GUIDO JAVIER ROSTEGUI AGUILAR  
MARCOS ROBERTO GOUVEA  
MATHEUS MINGATOS FERNANDES GEMIGNANI

# ENERGIA EÓLICA

fundamentos, tecnologia e aplicações

Projeto de P&D Gerenciador para Sistemas de Geração Intermitente,  
Fontes Complementares e Armazenagem de Energia

2021

*Energia eólica: fundamentos, tecnologia e aplicações*

© 2021 Ângelo Vian, Carlos Marcio Vieira Tahan, Guido Javier Rostegui Aguilar, Marcos Roberto Gouvea, Matheus Mingatos Fernandes Gemignani

Editora Edgard Blücher Ltda.

*Publisher* Edgard Blücher

*Editor* Eduardo Blücher

*Coordenação editorial* Jonatas Eliakim

*Produção editorial* Aline Fernandes

*Diagramação e capa* Laércio Flenic

*Revisão de texto* Samira Panini

*Imagem da capa* iStockphoto

---

# Blucher

Rua Pedroso Alvarenga, 1245, 4º andar  
04531-934 – São Paulo – SP – Brasil  
Tel 55 11 3078-5366  
contato@blucher.com.br  
www.blucher.com.br

Segundo Novo Acordo Ortográfico, conforme 5. ed.  
do Vocabulário Ortográfico da Língua Portuguesa,  
Academia Brasileira de Letras, março de 2009.

É proibida a reprodução total ou parcial por quaisquer  
meios, sem autorização escrita da Editora.

---

Todos os direitos reservados pela Editora  
Edgard Blücher Ltda.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Angélica Ilacqua CRB-8/7057

---

Energia eólica: fundamentos, tecnologia e  
aplicações / Ângelo Vian, Carlos Marcio Vieira Tahan,  
Guido Javier Rostegui Aguilar, Marcos Roberto Gouvea,  
Matheus Mingatos Fernandes Gemignani -- São Paulo:  
Blucher, 2021.  
146p.

#### Bibliografia

ISBN 978-65-5550-072-1 (impresso)  
ISBN 978-65-5550-058-5 (eletrônico)

#### Open Access

1. Energia eólica 2. Energia - Fontes alternativas I.  
Vian, Ângelo

21-0556

CDD 621.548

---

#### Índices para catálogo sistemático:

1. Energia eólica

---

# PREFÁCIO

A atenção mundial com o meio ambiente tem incentivado a pesquisa e a instalação de fontes de geração de energia elétrica sustentáveis que não agridam o planeta, dentre as quais destacam-se aquelas cujas fontes primárias são a energia dos ventos e a energia solar.

Com essa motivação a evolução tecnológica das gerações eólica e solar têm experimentado avanços muito importantes nas últimas duas décadas. A característica de produção intermitente dessas fontes traz novos desafios ao projeto e à operação dos sistemas elétricos, na medida que a disponibilidade de geração está condicionada a fenômenos da natureza que não podem ser controlados. Surge daí, a importância da armazenagem de energia.

Nesse ambiente, a presença de geração sustentável intermitente, de baterias para armazenagem e de cargas gerenciáveis cria sistemas autônomos, constituindo ilhas de geração/carga, interligadas ou não a outros sistemas.

Nasce portanto, a importância de pesquisa e do desenvolvimento de recursos tecnológicos para o gerenciamento do despacho econômico e eficiente desses sistemas híbridos.

A Companhia Energética de Petrolina, atenta aos movimentos do setor energético brasileiro e integrada no esforço do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento promovido pela ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, desenvolveu o projeto “Gerenciador para Sistemas de Geração Intermitente, Fontes Complementares e Armazenagem de Energia”, em colaboração com a Aries Engenharia e a FDTE - Fundação para o Desenvolvimento Tecnológico da Engenharia.

Com o objetivo de difundir conhecimentos adquiridos nesse projeto, entendeu-se oportuna a preparação desta publicação, onde os interessados pelo tema podem encontrar fundamentos, tecnologia e aplicações relativas à produção de energia elétrica a partir da energia eólica.

Cabe ressaltar que esta publicação é o resultado do esforço de vários pesquisadores e especialistas, citando informações de diversas fontes disponíveis no contexto internacional. Neste âmbito, aproveitamos esta oportunidade para deixar nossos agradecimentos pelas diversas discussões e contribuições oferecidas pelo Prof. Dr. Maurício Salles e seus orientados Luís Felipe Normandia Lourenço e Giovani Giulio Tristão Thibes Vieira.

Finalmente agradecemos à ANEEL, cujo programa de incentivo e promoção da pesquisa possibilitou a elaboração desta publicação.

*Hélio Takeno*  
*Companhia Energética de Petrolina*

---

# SUMÁRIO

<b>1. TURBINAS E GERAÇÃO EÓLICA</b> .....	<b>11</b>
1.1 INTRODUÇÃO.....	<b>11</b>
1.2 A ENERGIA EÓLICA NO BRASIL E NO MUNDO.....	<b>12</b>
1.3 CARACTERÍSTICAS DO VENTO.....	<b>14</b>
1.4 EVOLUÇÃO DAS TURBINAS EÓLICAS.....	<b>16</b>
1.4.1 TURBINAS DE EIXO VERTICAL.....	<b>17</b>
1.4.2 TURBINAS COM UMA E DUAS PÁS.....	<b>18</b>
1.4.3 LIMITAÇÃO DE POTÊNCIA NOMINAL DA TURBINA.....	<b>18</b>
1.4.4 OPERAÇÃO EM VELOCIDADE FIXA E VARIÁVEL.....	<b>19</b>
1.5 TURBINAS EÓLICAS MODERNAS.....	<b>20</b>
1.6 TURBINAS EÓLICAS DE PEQUENO PORTE.....	<b>22</b>
1.7 NOVOS DESAFIOS.....	<b>23</b>
<b>2. MODELAGEM DO VENTO E CONVERSÃO DE ENERGIA EÓLICA</b> .....	<b>25</b>
2.1 INTRODUÇÃO.....	<b>25</b>
2.2 MODELAGEM DO VENTO.....	<b>25</b>
2.3 PREVISÃO DA VELOCIDADE DO VENTO.....	<b>26</b>
2.3.1 MÉTODOS DE PREVISÃO.....	<b>27</b>
2.4 CONVERSÃO ENERGÉTICA VENTO-ELETRICIDADE.....	<b>30</b>
2.4.1 CONVERSÃO ELETROMECHANICA DE ENERGIA.....	<b>30</b>
2.4.2 POTÊNCIA MECÂNICA.....	<b>31</b>
2.4.3 POTÊNCIA ELÉTRICA E CURVAS DE POTÊNCIA.....	<b>35</b>
2.4.4 ANÁLISE DA PRODUÇÃO DE ENERGIA DE TURBINAS EÓLICAS MODERNAS.....	<b>36</b>

<b>3. EXPERIÊNCIAS RECENTES DA OPERAÇÃO COM ALTA PENETRAÇÃO DE ENERGIAS RENOVÁVEIS.....</b>	<b>41</b>
3.1 INTRODUÇÃO .....	41
3.2 CALIFORNIA ISO.....	42
3.3 ERCOT .....	44
3.4 DINAMARCA.....	45
3.5 CHINA.....	45
3.6 BRASIL.....	46
3.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	48
<b>4. PROCEDIMENTOS DE REDE PARA A CONEXÃO DE FAZENDAS EÓLICAS.....</b>	<b>49</b>
4.1 INTRODUÇÃO .....	49
4.2 REQUISITOS TÉCNICOS PARA A CONEXÃO DE FAZENDAS EÓLICAS NO BRASIL.....	50
4.2.1 HISTÓRICO E REQUISITOS TÉCNICOS.....	50
4.2.2 MODOS DE CONTROLE.....	51
4.2.3 GERAÇÃO OU ABSORÇÃO DE POTÊNCIA REATIVA.....	53
4.2.4 OPERAÇÃO EM REGIME DE TENSÃO NÃO NOMINAL .....	54
4.2.5 ATENDIMENTO DO FATOR DE POTÊNCIA EM REGIME DE TENSÃO NÃO NOMINAL.....	54
4.2.6 POTÊNCIA ATIVA DE SAÍDA APÓS A RECUPERAÇÃO DE DISTÚRBIOS NO SISTEMA.....	55
4.2.7 OPERAÇÃO EM REGIME DE FREQUÊNCIA NÃO NOMINAL.....	56
4.2.8 INÉRCIA SINTÉTICA DE UMA CENTRAL GERADORA EÓLICA.....	57
4.2.9 PARTICIPAÇÃO NO CONTROLE DE SOBREFREQUÊNCIA.....	58
4.2.10 INJEÇÃO DE CORRENTE REATIVA DURANTE CURTO-CIRCUITO E CURVA DE SUPORTABILIDADE DE TENSÃO ( <i>LOW VOLTAGE RIDE THROUGH</i> ).....	59
4.3 PROCEDIMENTOS DE REDE ADOTADOS NA EUROPA.....	61
4.3.1 OPERAÇÃO EM REGIME DE FREQUÊNCIA NÃO NOMINAL .....	62
4.3.2 OPERAÇÃO EM REGIME DE TENSÃO NÃO NOMINAL .....	63



4.3.3 PARTICIPAÇÃO NO CONTROLE DE FREQUÊNCIA .....	65
4.3.4 CONTROLE DE POTÊNCIA REATIVA E TENSÃO .....	67
4.3.5 OPERAÇÃO DURANTE DISTÚRBIOS DE TENSÃO.....	69
<b>4.4 PROCEDIMENTOS DE REDE DO ERCOT .....</b>	<b>71</b>
4.4.1 OPERAÇÃO EM REGIME DE FREQUÊNCIA NÃO NOMINAL .....	71
4.4.2 PARTICIPAÇÃO NO CONTROLE DE FREQUÊNCIA.....	72
4.4.3 CONTROLE DE POTÊNCIA ATIVA.....	73
4.4.4 CONTROLE DE POTÊNCIA REATIVA E TENSÃO .....	73
4.4.5 OPERAÇÃO DURANTE DISTÚRBIOS DE TENSÃO.....	74
<b>4.5 UM PARALELO ENTRE PROCEDIMENTOS DO MUNDO E NO BRASIL .....</b>	<b>74</b>
<b>5. MODELAGEM E CONTROLE DE TURBINAS EÓLICAS DE VELOCIDADE VARIÁVEL.....</b>	<b>77</b>
5.1 INTRODUÇÃO .....	77
5.2 MODELO GENÉRICO DE TURBINAS EÓLICAS DE VELOCIDADE VARIÁVEL .....	78
5.3 TURBINAS EÓLICAS BASEADAS EM GERADORES DE INDUÇÃO DUPLAMENTE ALIMENTADO .....	79
5.4 SISTEMA DE CONTROLE DA TURBINA EÓLICA BASEADA EM DFIG.....	81
5.4.1 INTRODUÇÃO.....	81
5.4.2 SISTEMA DE CONTROLE DO DFIG.....	82
5.5 MODELAGEM MATEMÁTICA.....	85
5.5.1 MODELO MATEMÁTICO DO CONVERSOR LIGADO À REDE ELÉTRICA .....	85
5.5.2 MODELO MATEMÁTICO E CONTROLE DO CONVERSOR DO LADO DO ROTOR.....	92
<b>6. ANÁLISE COMPUTACIONAL DE FAZENDAS EÓLICAS MODERNAS .....</b>	<b>109</b>
6.1 INTRODUÇÃO .....	109
6.2 ANÁLISE COM MODELO FASORIAL.....	110
6.2.1 SIMULAÇÃO DO CENÁRIO 1 .....	115
6.2.2 SIMULAÇÃO DO CENÁRIO 2.....	117

6.2.3 SIMULAÇÃO DO CENÁRIO 3 .....	<b>119</b>
6.2.4 SIMULAÇÃO DO CENÁRIO 4.....	<b>122</b>
6.3 ANÁLISES COM MODELO MÉDIO .....	<b>125</b>
6.4 ANÁLISES COM MODELO DETALHADO.....	<b>132</b>
6.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	<b>139</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>141</b>