

ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

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

ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

fundamentos, tecnologia e aplicações

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

2021

Armazenamento de energia: 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

Armazenamento de energia: 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.
136p.

Bibliografia

ISBN 978-65-5550-073-8 (impresso)
ISBN 978-65-5550-057-8 (eletrônico)

Open Access

1. Energia 2. Energia - Armazenamento I. Vian, Ângelo

21-0556

CDD 621.042

Índices para catálogo sistemático:
1. Energia - Armazenamento

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 armazenagem de energia elétrica em baterias eletroquímicas.

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

1. INTRODUÇÃO AO ARMAZENAMENTO DE ENERGIA.....	11
1.1 CUSTOS DE FABRICAÇÃO E PREÇOS DE COMERCIALIZAÇÃO.....	13
1.2 EVOLUÇÃO DOS SISTEMAS.....	16
1.3 SISTEMAS MODERNOS DE ARMAZENAMENTO	18
1.4 DEFINIÇÕES E CONCEITOS	20
1.5 EFICIÊNCIA ROUND-TRIP.....	24
1.6 ENVELHECIMENTO	25
1.7 NOVOS DESAFIOS.....	26
2. SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA.....	29
2.1 USINA HIDRELÉTRICA REVERSÍVEL (<i>PUMPED HYDRO</i>).....	29
2.1.1 FUNCIONAMENTO.....	30
2.1.2 PROJETO EM DESTAQUE.....	31
2.2 ARMAZENAMENTO DE ENERGIA EM AR COMPRIMIDO.....	31
2.2.1 FUNCIONAMENTO	32
2.2.2 PROJETO EM DESTAQUE.....	33
2.3 VOLANTE DE INÉRCIA (<i>FLYWHEEL</i>)	33
2.3.1 FUNCIONAMENTO	34
2.3.2 PROJETO EM DESTAQUE.....	34
2.4 BOBINAS SUPERCONDUTORAS (<i>SMES</i>).....	35
2.4.1 FUNCIONAMENTO	35
2.4.2 PROJETO EM DESTAQUE.....	35
2.5 SUPERCAPACITORES.....	36
2.5.1 FUNCIONAMENTO	37
2.5.2 PROJETO EM DESTAQUE.....	37

2.6 SISTEMAS ELETROQUÍMICOS (BATERIAS)	37
2.6.1 BATERIA DE SÓDIO-ENXOFRE	39
2.6.2 CHUMBO-ÁCIDO	40
2.6.3 ÍONS DE LÍTIÓ	42
2.6.4 CLORETO DE SÓDIO-NÍQUEL.....	44
2.7 BATERIAS DE FLUXO	45
2.8 DADOS GERAIS DE BATERIAS	47
2.9 TECNOLOGIAS FUTURAS DE BATERIAS ELETROQUÍMICAS	49
2.9.1 BATERIAS DE ZINCO-AR	49
2.9.2 BATERIAS AVANÇADAS DE CHUMBO-ÁCIDO	50
2.9.3 BATERIAS DE GRAFENO	50
2.9.4 BATERIAS DE ESPONJA DE COBRE	50
2.9.5 BATERIAS DE ALUMÍNIO-AR.....	51
3. TENDÊNCIAS NA EVOLUÇÃO DOS SISTEMAS ELÉTRICOS	53
3.1 CARACTERÍSTICAS DA DEMANDA	54
3.1.1 CRESCIMENTO DA DEMANDA.....	54
3.2 CARACTERÍSTICAS DA GERAÇÃO	57
3.2.1 GERAÇÃO CENTRALIZADA	58
3.2.2 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA	59
4. EXPERIÊNCIA RECENTE NA OPERAÇÃO	63
4.1 ESTADOS UNIDOS	66
4.1.1 MERCADOS DE ENERGIA AMERICANOS.....	68
4.1.2 APLICAÇÕES TÍPICAS.....	73
4.1.3 HAVAÍ.....	74
4.2 ITÁLIA	76
4.3 JAPÃO	79
4.4 COREIA DO SUL	80
4.5 AUSTRÁLIA	82

4.6 CHINA.....	83
4.7 ALEMANHA.....	85
4.8 BRASIL.....	87
4.9 CHILE.....	88
4.10 OUTROS PAÍSES.....	89
4.11 PROJETOS HÍBRIDOS.....	93
5. ESTUDOS ECONÔMICOS EM SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO.....	95
5.1 PROJEÇÃO DOS CUSTOS.....	95
5.2 REDUÇÃO DO USO DE COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS.....	96
5.2.1 SISTEMA ISOLADO (SOMENTE DIESEL).....	96
5.2.2 SISTEMA ISOLADO (COM ENERGIA RENOVÁVEL E DIESEL).....	98
5.3 ARBITRAGEM EM MERCADOS DE ENERGIA.....	99
5.3.1 TIPOS DE MERCADO.....	100
5.3.2 PREÇO DO MWH E RECEITA.....	100
5.4 CUSTO NIVELADO DE ENERGIA.....	102
5.5 INSTALAÇÃO NO CONSUMIDOR (<i>BEHIND-THE-METER - BTM</i>).....	102
6. MODELOS ELÉTRICOS E ENERGÉTICOS PARA BATERIAS.....	105
6.1 MODELOS ELÉTRICOS GENÉRICOS.....	105
6.1.1 MODELO R_{INT}	105
6.1.2 MODELO DE THÉVENIN MODIFICADO.....	106
6.1.3 MODELO THÉVENIN.....	107
6.1.4 MODELO DE REDES RC.....	107
6.2 SISTEMAS DE GERENCIAMENTO DA BATERIA.....	108
6.3 MODELOS PARA ANÁLISES EM SISTEMAS DE POTÊNCIA.....	110
6.3.1 MODELOS PARA ANÁLISES ENERGÉTICAS.....	110
6.3.2 MODELOS PARA ANÁLISES ELÉTRICAS.....	114
6.4 EXEMPLO DE APLICAÇÃO EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO.....	117
REFERÊNCIAS.....	121

