

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Dissertação de Mestrado

Modelagem do Despacho Econômico de
Energia Elétrica em Minirredes



Cristiane dos Santos Silva

João Pessoa-PB, Brasil
FEVEREIRO – 2018

CRISTIANE DOS SANTOS SILVA

**MODELAGEM DO DESPACHO ECONÔMICO DE ENERGIA ELÉTRICA EM
MINIRREDES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - PPGEE, da Universidade Federal da Paraíba - UFPB, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Yuri P. Molina Rodriguez

JOÃO PESSOA

2018

FICHA CATALOGRÁFICA

S586m Silva, Cristiane dos Santos.

Modelagem do despacho econômico de energia elétrica em minirredes / Cristiane dos Santos Silva. - João Pessoa, 2018.

100 f. : il.

Orientação: Yuri P Molina Rodriguez.

Dissertação (Mestrado) - UFPB/CEAR.

1. Engenharia Elétrica. 2. Despacho de Energia - minirrede. 3. Otimização - minirrede. 4. Mercado de Eletricidade. 5. Fontes Alternativas. I. Rodriguez, Yuri P Molina. II. Título.

UFPB/BC

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA – UFPB
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS – CEAR
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - PPGEE

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Dissertação

**MODELAGEM DO DESPACHO ECONÔMICO DE ENERGIA ELÉTRICA EM
MINIRREDES**

Elaborado por

CRISTIANE DOS SANTOS SILVA

como requisito para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Elétrica

COMISSÃO EXAMINADORA



DR. YURI PERCI MOLINA RODRIGUÊZ (Presidente)



DR. HELON D. MACÊDO BRAZ (Examinador Interno)



DR. ROGÉRIO GASPAS DE ALMEIDA (Examinador Externo ao PPGEE)

João Pessoa/PB, 27 de Fevereiro de 2018.

A Deus e aos meus pais

Dedico

AGRADECIMENTOS

A Deus pela força para lutar e seguir adiante com resiliência e perseverança diante dos obstáculos e desafios. A minha família pela paciência e apoio.

Ao Prof. Dr. Yuri P. Molina Rodriguez, pela dedicação nas correções e orientações neste período de aprendizado.

Ao Prof. Dr. Juan pelo apoio, confiança e espaço cedido no Laboratório do Grupo de Inteligência Computacional Aplicada a Engenharia Elétrica.

Aos professores membros da banca avaliadora, Dr. Helon David Macêdo Braz e Dr. Rogério Gaspar de Almeida pelas valiosas contribuições a este trabalho.

Aos demais professores e funcionários do CEAR, que contribuíram para realização deste sonho.

Aos meus colegas de pós-graduação que me incentivaram e me apoiaram nas dificuldades diárias, incluindo finais de semana e madrugadas, em especial Elisa Costa, Renato Ferreira, Tulio Oliveira, Jordan Falcão, Camila Jessica, Felipe Fernandes, Larissa Aguiar, Roberto de Castro e Tatiana Guedes.

Aos meus amigos do GICA por todos os ensinamentos, momentos maravilhosos e pela amizade sólida que construímos, em especial a Iuri Araújo, Bruno Winkeler, Caio Luiz, Jeane Souza, Diego Cavalcanti, Dennisy Silva, Joel Adelaide, Ricardo Guerra, Renzo Grover, Rafael Melo, e Wendell Farias.

Aos amigos que fiz no trecho e que estão espalhados pelo Brasil, pelo suporte e conselhos nos momentos difíceis em especial Jim Bahan, Luiz Celaro, Likio Nishiyama, Carlos Matoso, Saulo Braz e Francisco Carvalho, líderes que contribuíram muito para minha formação profissional.

A todos que colaboraram direta ou indiretamente na execução deste trabalho.

“Quando penso que cheguei ao meu limite, descubro que tenho forças para ir além...”

Ayrton Senna

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	VIII
LISTA DE TABELAS.....	IX
LISTA DE GRÁFICOS.....	X
LISTA DE SIGLAS	XI
LISTA DE SÍMBOLOS.....	XII
RESUMO	XIV
ABSTRACT	XV
1 INTRODUÇÃO.....	17
1.1 MOTIVAÇÃO.....	17
1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS	17
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	18
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	20
2.1 SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO	20
2.1.1 A evolução do Setor Elétrico Brasileiro.....	20
2.1.2 Mercado De Energia Elétrica.....	21
2.2 DESPACHO ECONÔMICO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	24
2.3 ECONOMIA APLICADA AO DESPACHO DE ENERGIA ELÉTRICA	27
2.3.1 Demanda	29
2.3.2 Oferta.....	29
2.3.3 Preço De Mercado	30
2.3.4 Elasticidade.....	34
2.3.5 Custo Fixo	35
2.3.6 Custo Variável.....	35
2.3.7 Custo Marginal	35
2.4 MINIRREDES.....	35
2.4.1 Equipamentos das minirredes simuladas	39
2.4.1.1 Sistemas armazenadores de energia	39
2.4.1.2 Sistema de Geração de Energia Solar	41
2.4.1.3 Sistema de Geração de Energia Eólica.....	43
2.4.1.4 Sistema de Geração de Energia Termelétrica.....	44
2.4.2 Investimentos para geração de energia elétrica	45
2.4.3 Panorama das Minirredes	46

2.4.4	Estudos de Referência	48
2.5	OTIMIZAÇÃO.....	48
2.5.1	Conceito de otimização	49
2.5.2	Método do Gradiente Reduzido Generalizado.....	50
3	FORMULAÇÃO MATEMÁTICA.....	55
3.1	MODELAGEM DO DESPACHO ECONÔMICO DE ENERGIA ELÉTRICA EM MINIRREDES	55
3.1.1	CASO 1.....	57
3.1.2	CASO 2.....	58
3.1.3	CASO 3.....	60
3.1.4	CASO 4.....	61
3.1.5	CASO 5.....	63
4	MATERIAL E MÉTODO.....	66
4.1	GAMS	66
4.2	ALGORITMO PROPOSTO.....	68
4.3	DADOS DAS SIMULAÇÕES.....	69
4.3.1	Dados do Sistema de Energia Solar.....	70
4.3.1.1	Cenário A.....	70
4.3.1.2	Cenário B.....	71
4.3.2	Dados do Sistema de Energia Eólica	72
4.3.2.1	Cenário A.....	72
4.3.2.2	Cenário B.....	72
4.3.3	Dados do Sistema de Armazenamento	74
4.3.3.1	Cenário A.....	74
4.3.3.2	Cenário B.....	75
4.3.4	Dados do Sistema de Energia Termelétrica	75
5	ANÁLISE DOS RESULTADOS	77
5.1	SIMULAÇÕES DO CASO BASE	77
5.2	SIMULAÇÕES DO CASO 1	77
5.2.1	Cenário A	77
5.2.2	Cenário B	79
5.3	SIMULAÇÕES DO CASO 2	80
5.3.1	Cenário A	80
5.3.2	Cenário B	82

5.4	SIMULAÇÕES DO CASO 3	83
5.4.1	Cenário A	83
5.4.2	Cenário B	84
5.5	SIMULAÇÕES DO CASO 4	86
5.5.1	Cenário A	86
5.5.2	Cenário B	87
5.6	SIMULAÇÕES DO CASO 5	89
5.6.1	Cenário A	89
5.6.2	Cenário B	91
5.7	COMPARATIVO DAS MINIRREDES	92
6	CONCLUSÕES.....	96
	REFERÊNCIAS	98

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Mudanças do Setor Elétrico brasileiro	20
Figura 2.2 - Estrutura Institucional do Setor Elétrico Brasileiro	20
Figura 2.3 - Linha do tempo do Setor Elétrico brasileiro	21
Figura 2.4 - Tipos de Leilões de Energia.....	23
Figura 2.5 - Ambientes de contratação de eletricidade no Brasil	23
Figura 2.6 - Sequência de funcionamento do despacho de energia	26
Figura 2.7 - Definição do despacho pelo ONS	26
Figura 2.8 - PRODIST Módulo 3 – Proposta para acesso ao Sistema de Distribuição	27
Figura 2.9 - Esquema típico de minirredes conectados nas redes de BT e MT	38
Figura 2.10 - Principais componentes de um sistema de geração de energia solar .	42
Figura 2.11 - Principais componentes de um sistema eólico	43
Figura 2.12 - Plano Decenal de Expansão de Energia	45
Figura 2.13 - Etapas gerais do processo de otimização	49
Figura 3.1 - Minirrede do caso 1	57
Figura 3.2 - Minirrede do caso 2.....	59
Figura 3.3 - Minirrede do caso 3.....	60
Figura 3.4 - Minirrede do caso 4.....	62
Figura 3.5 - Minirrede do caso 5.....	63
Figura 4.1 - Algoritmo proposto	69
Figura 4.2 - Mapa do potencial solar mundial	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Custos de investimento referenciais na geração de energia elétrica	46
Tabela 4.1 - Dados de produção de energia solar para o Cenário A	71
Tabela 4.2 - Dados de produção de energia solar Cenário B	71
Tabela 4.3 - Dados de produção de energia Eólica Cenário A	72
Tabela 4.4 - Dados da turbina E92 adaptada do Manual Enercon	73
Tabela 4.5 - Dados de produção de energia Eólica Cenário B	74
Tabela 4.6 - Dados do Sistema de Armazenamento	74
Tabela 4.7 - Dados do Sistema de Armazenamento	75
Tabela 5.1 - Caso base: Resultados da Concessionária	77
Tabela 5.2 - Minirrede do Caso 1: Cenário A	78
Tabela 5.3 - Minirrede do Caso 1: Cenário B	79
Tabela 5.4 - Minirrede do Caso 2: Cenário A	81
Tabela 5.5 - Minirrede do Caso 2: Cenário B	82
Tabela 5.6 - Minirrede do Caso 3: Cenário A	84
Tabela 5.7 - Minirrede do Caso 3: Cenário B	85
Tabela 5.8 - Minirrede do Caso 4: Cenário A	87
Tabela 5.9 - Minirrede do Caso 4: Cenário B	88
Tabela 5.10 - Minirrede do Caso 5: Cenário A	90
Tabela 5.11 - Minirrede do Caso 5: Cenário B	92
Tabela 5.12 - Comparativo das Minirredes por Caso e Cenário	93

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 2.1 - Curva de Demanda.....	29
Gráfico 2.2 - Curva de oferta.....	30
Gráfico 2.3 - Oferta X Demanda.....	30
Gráfico 2.4 - Aumento da demanda	31
Gráfico 2.5 - Diminuição da demanda	31
Gráfico 2.6 - Aumento da oferta	32
Gráfico 2.7 - Diminuição da oferta.....	32
Gráfico 2.8 - Consequências do estabelecimento de preços teto no mercado	33
Gráfico 2.9 - Tentativa de estabelecer preços mínimos.....	33
Gráfico 2.10 - Curva teórica de potência de uma turbina eólica	44
Gráfico 2.11 - Evolução da potência instalada (MW) até 23/05/17	46
Gráfico 2.12 - Número de micro e minigeradores até 23/05/2017	47
Gráfico 4.1 - Curva de potência calculada, turbina E92.....	73
Gráfico 5.1 - Minirrede do Caso 1: Cenário A.....	78
Gráfico 5.2 - Minirrede do Caso 1: Cenário B.....	79
Gráfico 5.3 - Minirrede do Caso 2: Cenário A.....	81
Gráfico 5.4 - Minirrede do Caso 2: Cenário A.....	82
Gráfico 5.5 - Minirrede do Caso 3: Cenário A.....	83
Gráfico 5.6 - Minirrede do Caso 3: Cenário B.....	85
Gráfico 5.7 - Minirrede do Caso 4: Cenário A.....	86
Gráfico 5.8 - Minirrede do Caso 4: Cenário B.....	88
Gráfico 5.9 - Minirrede do Caso 5: Cenário A.....	89
Gráfico 5.10 - Minirrede do Caso 5: Cenário A – Ampliação (eólica, solar e bateria).....	90
Gráfico 5.11 - Minirrede do Caso 5: Cenário B.....	91
Gráfico 5.12 - Comparativo da resposta da Concessionária para cada configuração de minirrede no cenário B.	93

LISTA DE SIGLAS

ACL	Ambiente de Contratação Livre
ACR	Ambiente de Contratação Regulada
ANA	Agência Nacional de Águas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis.
AT	Alta tensão
BT	Baixa tensão
CADE	Conselho Administrativo de Defesa Econômica
CAG	Controle automático de geração
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
CDGD	Centro de despacho de geração distribuída
CEPEL	Centro de Pesquisa de Energia Elétrica
CERTS	<i>Consortium for Electricity Reliability Technology Solutions</i>
CIGRE	<i>International Conference on Large High Voltage Electric Systems</i>
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CMO	Custo Marginal De Operação
CMSE	Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico
DNAEE	Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica
ELETRORAS	Centrais Elétricas Brasileira
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EPRI	<i>Electric Power Research Institute</i>
GAMS	<i>General Algebraic Modelling System</i>
GRG	Gradiente Reduzido Generalizado
MJ	Ministério da Justiça
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MME	Ministério de Minas e Energia
MT	Média tensão
NLP	<i>Nonlinear programming</i>
ONS	Operador Nacional do Sistema
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
PLD	Preço de Liquidação das Diferenças
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
SDE	Secretaria de Direito Econômico
SEAE	Secretaria de Acompanhamento Econômico
SIN	Sistema Interligado Nacional
SNRH	Secretaria Nacional de Recursos Hídricos

LISTA DE SÍMBOLOS

FO_1	Função objetivo da minirrede do caso 1
FO_2	Função objetivo da minirrede do caso 2
FO_3	Função objetivo da minirrede do caso 3
FO_4	Função objetivo da minirrede do caso 4
FO_5	Função objetivo da minirrede do caso 5
λ_R	Preço da energia da Concessionária
P_R	Potência da Concessionária
P_B	Injeção de potência do sistema de armazenamento
P_C	Carga Demandada
P_{Bmin}	Mínima injeção de potência do sistema de armazenamento
$P_{Bmáx}$	Máxima injeção de potência do sistema de armazenamento
SOC	<i>State of Charge</i>
SOC_{min}	<i>Minimum State of Charge</i>
$SOC_{máx}$	<i>Maximum State of Charge</i>
$C_i(P_{Gi})$	Função de custo por unidade geradora i
a_i, b_i, c_i	Coefficientes característicos da função custo da unidade geradora i
P_{Gi}	Potências de saída de cada unidade geradora de energia i .
$P_{Gmáx_i}$	Limite máximo de geração i
P_{Gmin_i}	Limite mínimo de geração i
λ_S	Preço da energia solar
P_S	Injeção de potência do sistema de geração de energia solar
I_{solar}	Irradiação incidente nos painéis solares
λ_E	Preço da energia eólica
P_E	Injeção de potência do sistema de geração de energia eólica
E_d	Elasticidade da demanda
E_o	Elasticidade da oferta
ΔQ_d	Variação da quantidade demandada
Q_d	Quantidade demandada
ΔQ_o	Variação da quantidade ofertada
Q_o	Quantidade ofertada
Δ_d	Variação de preço
P	Preço do item demandado ou ofertado
$f(x)$	Função objetivo
$h_j(x)$	Restrição j
γ	Fator de amortecimento
x	Variável de decisão
g_R^k	Gradiente reduzido na iteração k

Δ_i^k	Direção da variação das variáveis independentes i na iteração k
Δ_D^k	Direção da variação das variáveis dependentes D na iteração k
x_i^{k+1}	Magnitude da variação das variáveis independentes
\tilde{x}_D^{k+1}	Magnitude da variação das variáveis dependentes

RESUMO

MODELAGEM DO DESPACHO ECONÔMICO DE ENERGIA ELÉTRICA EM MINIRREDES

Ao longo do tempo a demanda por energia elétrica tem aumentado, novas fontes de energia estão sendo inseridas no Sistema Elétrico, que está cada vez mais interligado e com topologia mais diversificada com a inserção das minirredes. Diante deste panorama um dos principais objetivos da operação dos mercados de eletricidade é a otimização destes recursos, nascendo a questão de como despachar a energia gerada para atender à demanda de forma mais econômica e eficaz. Com o objetivo de estudar esse panorama, este trabalho se propõe a elaborar um modelo para o despacho econômico de energia elétrica em minirredes. A modelagem foi elaborada considerando cinco casos que correspondem a diferentes arranjos de minirredes. As simulações foram implementadas no software GAMS, sendo realizadas para dois cenários. No primeiro cenário foi considerada a redução do consumo de energia da rede da Concessionária; e no segundo cenário foi considerada a injeção de energia elétrica na rede da Concessionária. Os resultados obtidos mostram que a estratégia aplicada aos modelos propostos foi bem-sucedida.

Descritores: Despacho de Energia, Microrrede, Otimização, Minirrede, GAMS, Mercado de Eletricidade, Fontes Alternativas.

ABSTRACT

MODELING OF THE ECONOMIC DISPATCH OF ELECTRIC ENERGY IN MINIGRIDS

Over time the demand for electric energy has increased and new energy sources are being introduced into the Power System, which is increasingly interconnected and with a more diversified topology with the insertion of minigrids. In view of this scenario, one of the main objectives for operation in the electricity markets is the optimization of these resources, raising the question of how to dispatch the energy generated to meet the demand in a more economical and efficient way. With the objective of studying this scenario, this dissertation proposes a model for the economic dispatch of electric energy in minigrids. The model was developed considering five cases that correspond to different arrangements of minigrids. The simulations were implemented in the GAMS software, being performed for two scenarios. The first scenario considered a reduction of energy consumption from the grid of the Power Distribution Company; and the second considered an injection of electric energy into the grid of the Power Distribution Company. The results obtained show that the strategy applied to the proposed models was successful.

Key words: Economic Dispatch, Microgrid, Optimization, Minigrid, GAMS, Electricity Market, Alternative Energy.

1 INTRODUÇÃO

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

O setor elétrico tem passado por várias mudanças organizacionais e normativas, paralelamente os sistemas elétricos também foram se tornando cada vez mais interligados, complexos, e com maiores necessidades de *upgrade* tecnológico para integrar as minirredes; que podem reduzir os lucros e consequentemente o interesse das distribuidoras que mantêm as linhas tronco e subestações de distribuição. Este cenário de desafios, alavancou a questão de como despachar energia elétrica para atender à demanda de forma mais econômica e eficaz. Esse problema é conhecido como despacho econômico [1].

O despacho econômico caracteriza-se por minimizar os custos de operação do sistema elétrico, ou seja, o objetivo de um problema de despacho econômico é determinar a melhor combinação de potências entre as unidades produtoras que devem entrar em funcionamento, com objetivo de atender as necessidades da carga ao menor custo possível, satisfazendo as restrições de igualdade e desigualdade do sistema. Como cada unidade de geração possui um custo diferente de acordo com o tipo de fonte, o despacho econômico destaca-se por distribuir a demanda total entre as várias unidades, em um determinado instante. Ainda, o despacho econômico fornece o custo marginal do sistema em R\$/MWh, ou seja, quanto custa o aumento de mais 1 MW na demanda do sistema. O custo marginal do sistema pode ser utilizado como um sinalizador para os preços cobrados pela energia elétrica consumida [2].

O presente trabalho tem como objetivo geral estudar, e implementar na linguagem GAMS, o despacho de energia elétrica em minirredes.

1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

Este trabalho possui os seguintes objetivos específicos:

1. Aprender a linguagem GAMS;
2. Apresentar a origem do despacho econômico, sua regulamentação e como este opera no sistema elétrico brasileiro, para dar base ao estudo;
3. Compreender a importância do despacho de energia para o mercado elétrico brasileiro;

4. Estudar e compreender os conceitos e a regulamentação das minirredes;
5. Estudar os principais conceitos econômicos relacionados ao despacho econômico;
6. Estudar fontes despacháveis e intermitentes de energia elétrica;
7. Propor a arquitetura de uma minirrede que possa trabalhar ligada à rede principal; e
8. Simular o despacho econômico de minirredes com várias fontes de energia elétrica no GAMS.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Essa dissertação está organizada em sete capítulos. No primeiro capítulo está apresentada a introdução contendo a motivação e os objetivos do tema escolhido para essa dissertação.

O capítulo 2 aborda o referencial teórico que inclui tópicos importantes para a compreensão desse trabalho, tais como um breve histórico do setor elétrico brasileiro, os conceitos de despacho econômico de energia elétrica e das minirredes. Além disso foi mostrado o modelo de otimização utilizado.

No capítulo 3 está descrita a formulação matemática e as premissas consideradas na modelagem do despacho econômico de energia elétrica em minirredes.

O capítulo 4 apresenta o material e a metodologia utilizada, contendo detalhes do desenvolvimento do trabalho. Os resultados obtidos são descritos no capítulo 5. No capítulo 6 são apresentadas as conclusões. Algumas sugestões para trabalhos futuros são citadas no capítulo 6, e por fim, as referências bibliográficas utilizadas são dispostas no capítulo 7.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

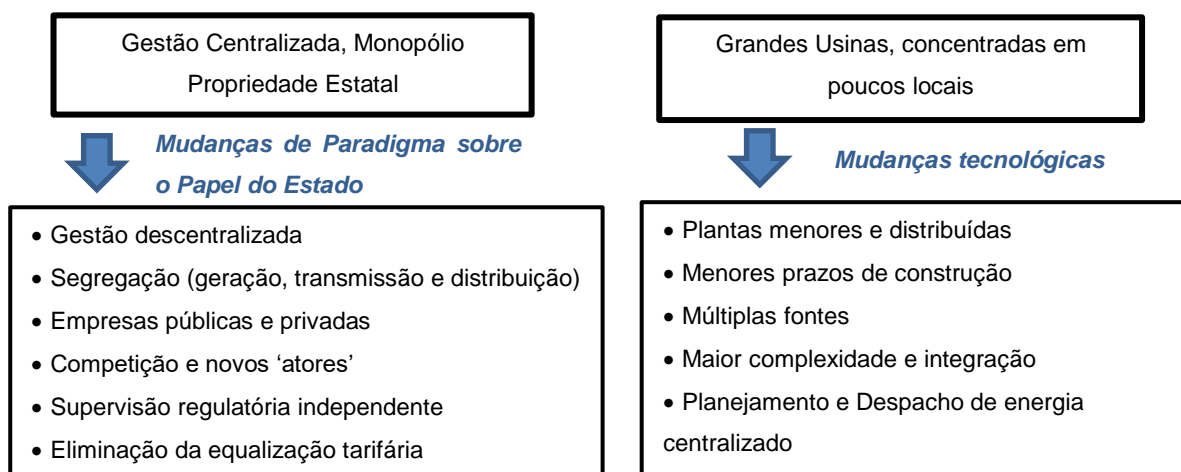
2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO

2.1.1 A evolução do Setor Elétrico Brasileiro

O setor elétrico brasileiro passou por diversas mudanças que acompanharam tendências mundiais do setor elétrico em termos de evoluções administrativas, regulatórias, econômicas, organizacionais e tecnológicas [3], Figura 2.1.

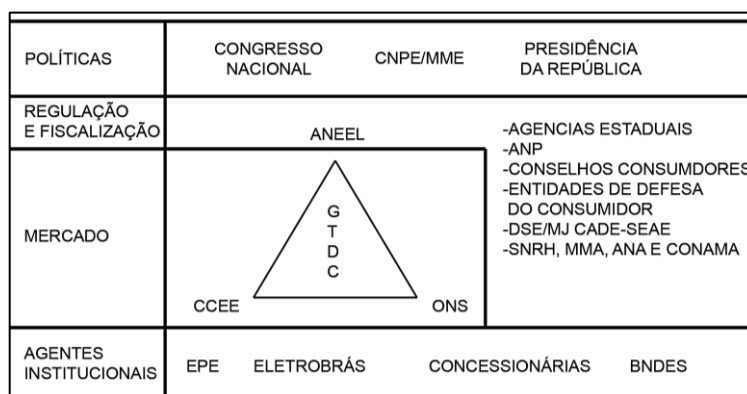
Figura 2.1 - Mudanças do Setor Elétrico brasileiro



Fonte: Autor

No novo modelo do setor, incidiram uma série de mudanças organizacionais, ilustradas em linhas gerais no esquema da Figura 2.2 [4].

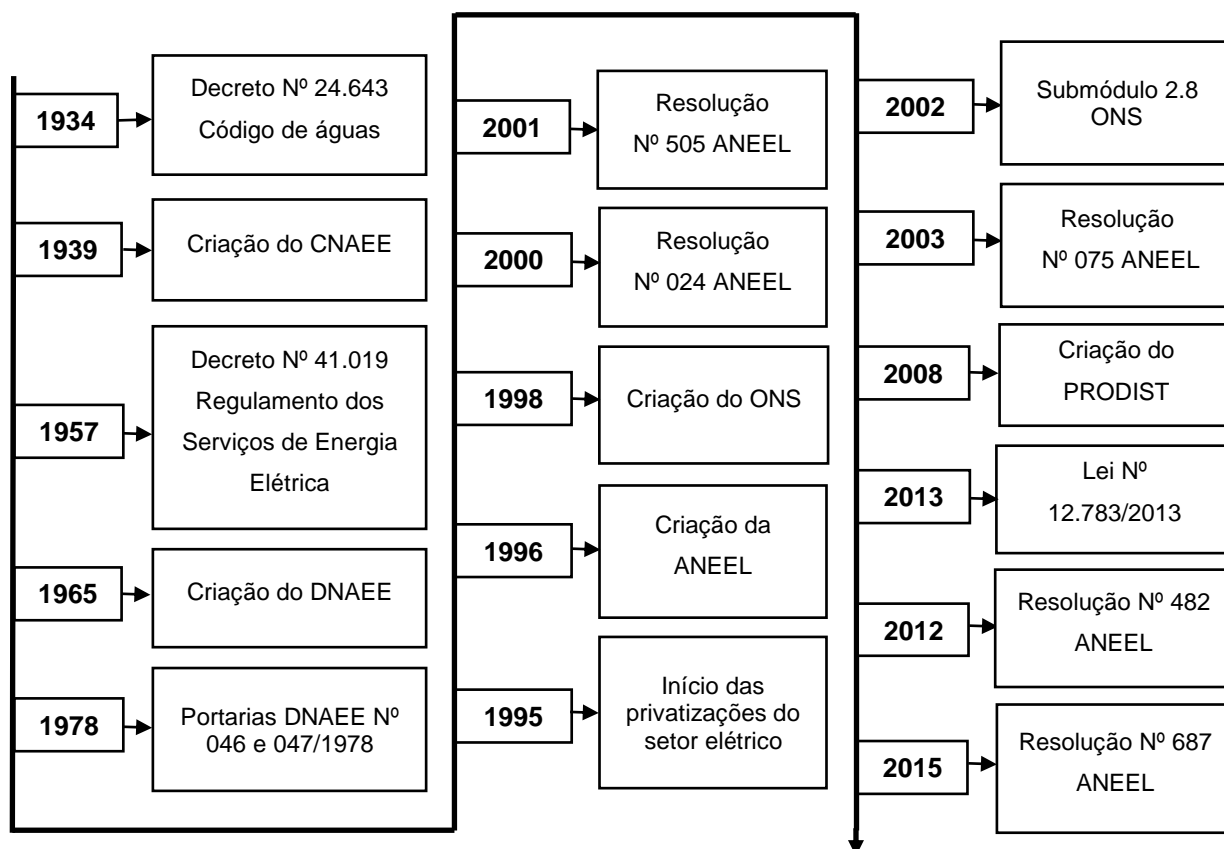
Figura 2.2 - Estrutura Institucional do Setor Elétrico Brasileiro



Fonte: Adaptado de [4]

Na Figura 2.3 esta apresentada uma linha cronológica apresentando essas mudanças e os principais marcos regulatórios.

Figura 2.3 - Linha do tempo do Setor Elétrico brasileiro



Fonte: Autor

Essas reformas tornaram o setor elétrico, um ambiente mais competitivo, no entanto não garantiu a oferta de energia, levando o país ao racionamento em 2001. Por este motivo, com o objetivo de garantir a segurança energética, o planejamento do despacho de energia elétrica tem ganhado força e a matriz energética tem se diversificado cada vez mais para atender as necessidades do mercado.

2.1.2 Mercado De Energia Elétrica

Este tópico foi estudado com o objetivo de classificar o consumidor industrial hipotético deste trabalho e verificar alguma possível restrição a ser acrescentada no modelamento do problema.

O mercado atacadista brasileiro é segmentado em dois ambientes de contratação: ACR e ACL [3].

No ACR os contratos são bilaterais regulados de longo prazo realizados entre as geradoras e produtores independentes e as distribuidoras. Cada distribuidora tem o dever de declarar suas necessidades de energia ao MME antes cada leilão, para que seja garantida a contratação de 100% de sua demanda e o governo faz, através da CCEE, um leilão único para atender às necessidades das distribuidoras. Terminado o leilão, a energia adquirida é dividida entre as distribuidoras de acordo com as respectivas declarações de necessidade de energia. Dessa forma, cada distribuidora realiza contrato de comercialização de energia elétrica no ambiente regulado, com as geradoras vencedoras. Os tipos de leilões para o ACR, estão apresentados na Figura 2.4 [5].

No ACL a contratação é realizada com contratos bilaterais, com condições livremente acordadas entre os agentes de geração, comercialização, consumidores livres, importadores e exportadores de energia elétrica. Existem dois tipos de consumidores no ACL:

- Consumidor livre é aquele no qual a demanda é igual ou superior a 3 MW e cuja tensão de conexão à rede tem tensão igual ou superior a 69 kV. Os consumidores livres podem negociar eletricidade com geradores ou comercializadores.
- Consumidor especial tem que possuir uma demanda contratada igual ou maior que 500 kW e pode ser atendido a qualquer nível de tensão. Diferentemente dos consumidores livres, esse consumidor só pode negociar e adquirir eletricidade gerada através de fontes incentivadas¹ com potência de até 30 MW.

Na Figura 2.5 esta desenhado o funcionamento dos dois ambientes do mercado atacadista de eletricidade, a cargo da CCEE [6]. Nesta verifica-se a dependência dos consumidores cativos com relação a distribuidora.

¹ Fontes incentivadas são pequenas centrais hidrelétricas, usinas eólicas, termelétricas a biomassa e resíduos, e empreendimentos solares.

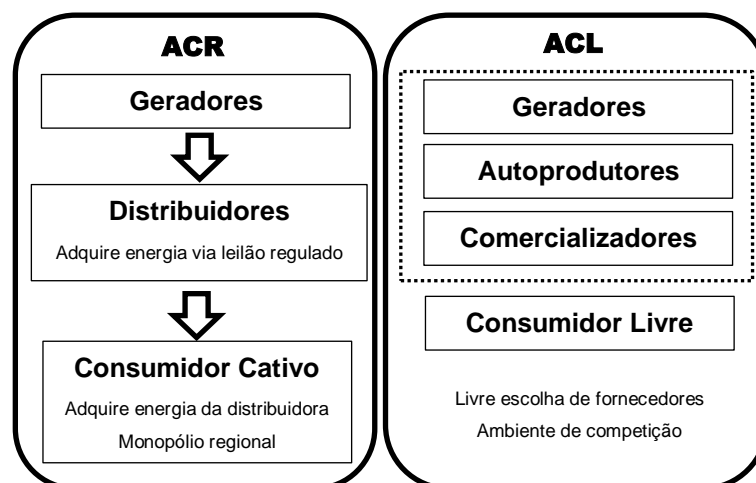
Figura 2.4 - Tipos de Leilões de Energia



*Serviços ancilares: os provedores de energia reativam por unidades geradoras solicitadas a operar como compensador síncrono, de CAG, de autorrestabelecimento e de sistemas especiais de proteção.

Fonte: Autor

Figura 2.5 - Ambientes de contratação de eletricidade no Brasil



Fonte: Adaptado de [6]

O mercado varejista no Brasil ainda é pequeno, pois inclui somente os consumidores especiais, ou seja, aqueles consumidores livres que utilizam fontes incentivadas em troca de um desconto ou crédito nas tarifas de uso de redes. Como esses usuários necessitam de um determinado nível de consumo, o mercado livre não é aberto aos consumidores residenciais. Atualmente, não existe nenhuma previsão de fazer com que os consumidores residenciais sejam elegíveis a adquirir eletricidade livremente em um mercado varejista, já que a Resolução Normativa Nº 687 da ANEEL [7] prevê apenas a comercialização entre integrantes vinculados. No caso do consumidor industrial hipotético deste trabalho, pelo fato de não existirem produtores de fontes incentivadas que se enquadrem nos requisitos citados na localidade do consumidor, a negociação de energia com produtores de fontes incentivadas não foi inserida na formulação.

2.2 DESPACHO ECONÔMICO DE ENERGIA ELÉTRICA

O Sistema Elétrico Brasileiro é predominantemente hidrelétrico, sendo este perfil adotado naturalmente, já que o país é detentor de grandes recursos hídricos. As usinas termelétricas, apenas entram em operação para atender situações emergenciais como suprimento no caso de uma falha no sistema ou nos períodos de “pico” da demanda. No entanto, essa conjuntura foi mudando gradativamente nos últimos anos devido aos constantes períodos de seca e o aumento da demanda. Dentro deste cenário, a inserção da geração térmica, tornou-se importante para a minimização dos riscos de racionamento e aumento da confiabilidade do sistema elétrico. Desta forma, o estudo do despacho econômico de energia elétrica tem ganho espaço em estudos e pesquisas [8].

O despacho econômico possui o objetivo de minimizar o custo de produção de energia elétrica através da otimização da distribuição da produção entre os geradores e da utilização eficiente dos recursos energéticos [2]. Basicamente, há dois

tipos de modelos de despacho, o despacho centralizado (Modelo *Pool*, que se divide em *Tigh Pool*² e *Loose Pool*³) e o auto despacho (Modelo Bilateral) [3].

No primeiro, o operador independente decide como despachar conforme a função objetivo que lhe é dada como, por exemplo, despachar as usinas mais baratas, seja com base em seus custos, previamente definidos, ou com base em suas ofertas de preços. O auto despacho, por sua vez, implica em geradores decidindo a respeito do despacho de suas unidades geradoras, usualmente com base em suas obrigações comerciais.

No caso brasileiro o despacho é centralizado pelo ONS, sendo portanto do tipo *Tigh Pool*. A função objetivo do operador é minimizar o custo total da operação que corresponde à soma dos custos imediatos e futuros calculados a partir de modelos computacionais. Fontes intermitentes tem custo marginal nulo. Para as termelétricas é definido um custo variável regulatório, denominado de custo variável unitário. A vazão hidráulica futura, no entanto, é incerta por depender das chuvas [9]. Em termos práticos, a solução é implementada por meio de dois modelos matemáticos desenvolvidos pelo CEPEL da Eletrobrás [10]:

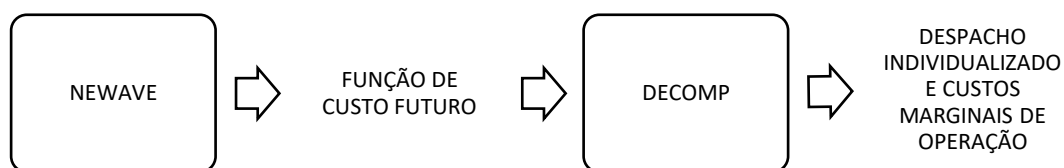
- NEWAVE: Modelo de Planejamento da Operação de Sistemas Hidrotérmicos Interligados no Longo e Médio Prazo. Este modelo determina a estratégia de geração hidráulica e térmica em cada estágio que minimiza o valor esperado do custo de operação para todo o período de planejamento.
- DECOMP: Modelo de Planejamento da Operação de Sistemas Hidrotérmicos Interligados de Curto Prazo. Este modelo de otimização é utilizado para um horizonte de doze meses e faz uso da função de custo futuro, calculada pelo NEWAVE como dado de entrada. Os principais resultados desse modelo são os despachos de geração por usina hidráulica e térmica de cada submercado, e os custos marginais de operação para cada estágio por patamar de carga.

² O despacho é realizado por um operador do sistema com base nas ofertas de preços apenas dos geradores termelétricos e no custo de déficit, utilizando sistemas de otimização, ou seja com valor fixo.

³ Os produtores de energia e os consumidores fazem propostas de volumes e preços que estão dispostos a praticar, ou seja os preços são previsíveis. Este modelo é praticado por exemplo na Inglaterra e na Colômbia.

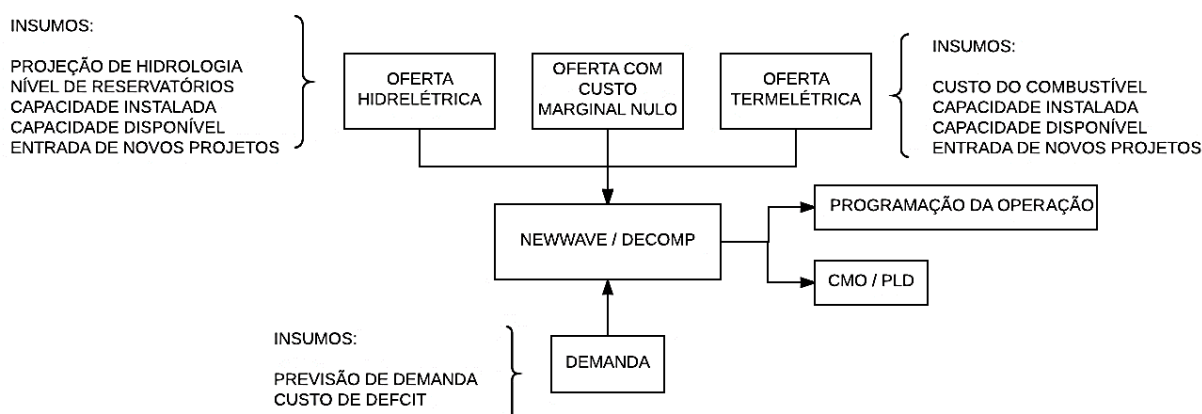
O modelo NEWAVE é simulado uma vez por mês, enquanto o DECOMP é rodado a cada semana. A partir do modelo encadeado, dado que os modelos são rodados de forma sequencial, é definido o despacho das usinas. Em outras palavras, por meio desse procedimento o operador define a quantidade de energia a ser produzida por cada usina do SIN a cada semana. A Figura 2.6 resume o funcionamento do despacho e a Figura 2.7 sintetiza o despacho pelo ONS.

Figura 2.6 - Sequência de funcionamento do despacho de energia



Fonte: Adaptado de [10]

Figura 2.7 - Definição do despacho pelo ONS



Fonte: Adaptado de [10]

Além da programação do despacho, os programas também definem o CMO⁴, que é base para o PLD⁵ utilizado na liquidação de diferenças no mercado de curto

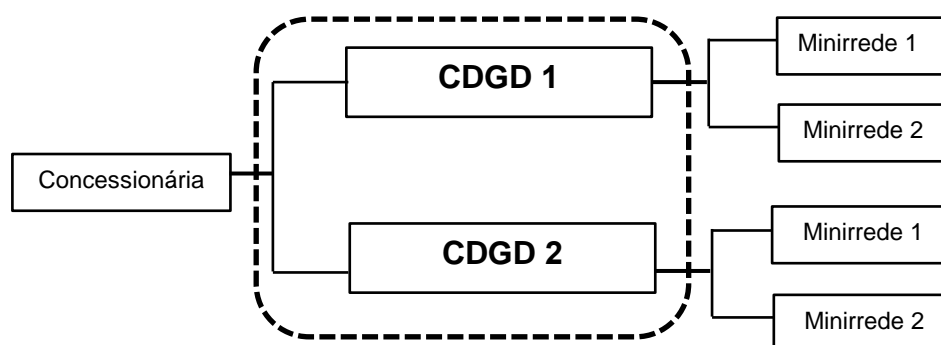
⁴ CMO é o custo variável associado à fabricação de um produto. Nos termos do mercado de energia se trata do custo para se produzir o próximo MWh necessário ao sistema elétrico, e conforme previsto na legislação vigente, deve ser a base para o PLD.

⁵ O PLD ou preço spot é uma tarifa aplicada na compra e venda de energia a curto prazo. A composição de seu valor fica sujeita principalmente a disponibilidade de água nos reservatórios de hidrelétricas e ao nível de precipitação pluviométrico.

prazo. Por fim, o CMSE, com vistas a garantir a segurança do suprimento energético, pode determinar o despacho de usinas fora da ordem de mérito de custo, ou seja, com custo marginal maior do que o CMO calculado pelos modelos computacionais de otimização do despacho [11].

Com relação ao despacho de energia elétrica da geração distribuída⁶, que compreende as minirredes, o PRODIST Módulo 3 que trata do acesso ao Sistema de Distribuição, sugere que a distribuidora reúna as centrais geradoras de uma mesma área conectadas ao seu sistema de distribuição formando um CDGD, Figura 2.8. Entretanto, não estabelece uma arquitetura a ser seguida, ou critérios para o despacho da energia gerada pelas minirredes. Por esse motivo este trabalho considerou no modelamento do despacho de energia das minirredes, apenas o critério da existência de produção de energia excedente para realizar o despacho de energia da minirrede para a rede da Concessionária [12].

Figura 2.8 - PRODIST Módulo 3 – Proposta para acesso ao Sistema de Distribuição



Fonte: Autor

2.3 ECONOMIA APLICADA AO DESPACHO DE ENERGIA ELÉTRICA

Este item trata dos principais conceitos de economia aplicados ao despacho de energia elétrica, pois a energia elétrica é um insumo básico da sociedade moderna e, como tal, está sujeita às leis de mercado. Apesar do preço da eletricidade ser fixo

⁶ A definição do termo geração distribuída consta no artigo 14 do Decreto Nº 5.163, de 30 de Julho de 2004. Está caracterizada pela instalação de geradores localizados próximos aos centros de consumo de energia elétrica.

no mercado brasileiro, é importante compreender como funciona o despacho de energia elétrica em outros mercados onde há competição.

A Economia é uma ciência social que se preocupa com o uso eficiente de recursos escassos para maximizar a satisfação das necessidades econômicas. Toda a teoria econômica baseia-se: na escassez de recursos, na liberdade de escolha, e na racionalidade baseada no custo marginal e no benefício marginal [13].

No caso da energia elétrica, a sua disponibilidade é escassa devido às limitações das fontes de energia, devido à limitação de usinas geradoras e devido à limitação imediata de recursos financeiros para a construção de novas usinas.

De acordo com a teoria econômica, a racionalidade do mercado encontra seu ponto de equilíbrio quando a sociedade produz quantidades de bens e serviços de tal forma que o benefício adicional obtido com qualquer novo bem se iguale ao custo adicional de produzi-lo. Especificamente, no caso da energia elétrica, isto significa que o preço da energia elétrica encontrará seu ponto de equilíbrio quando este preço for igual ao custo marginal de produzir uma nova unidade de energia.

Estes princípios aparentemente simples sofrem distorções na vida real por razões técnicas ou políticas. Por exemplo, o poder de escolha dos consumidores de energia elétrica limita-se à decisão de utilizá-la ou não em determinado momento, adquirir novo aparelho eletrodoméstico ou utilizar uma tecnologia mais eficiente.

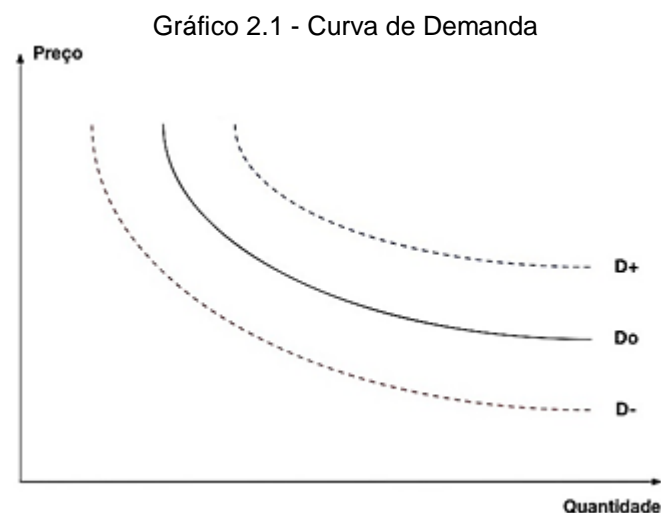
Uma nova indústria pode decidir utilizar o gás natural, o óleo combustível ou mesmo a eletricidade para produzir o calor necessário ao seu processo, mas existe um consumo de energia elétrica que não tem substituição.

No entanto, a liberdade de escolher o fornecedor de energia não existe como existe para outros bens e serviços devido à existência do monopólio da distribuição. Monopólios são indesejáveis porque conduzem a ineficiência. Contudo, no caso da distribuição de energia elétrica, é praticamente impossível estabelecer a competição de duas empresas em uma mesma área geográfica devido à infraestrutura.

Outra distorção encontrada na prática é a intervenção governamental na comercialização da energia elétrica. Sempre que ela aparece, na forma de controle de preços, a consequência é o racionamento ou outras distorções [14].

2.3.1 Demanda

A Demanda agregada dos consumidores, em relação a uma determinada mercadoria, diminui com o aumento do preço desta mercadoria, considerando que todas as outras condições permaneceram constantes. Este comportamento é chamado de lei da demanda e está ilustrado no Gráfico 2.1 [13].



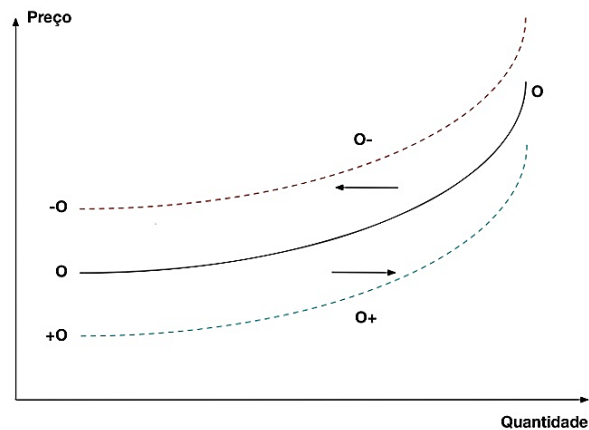
Fonte: Adaptado de [13]

No Gráfico 2.1, D_0 indica a demanda inicial, D_- indica a redução da demanda e D_+ indica o aumento da demanda. Analisando este gráfico, verifica-se que a quantidade demandada aumenta à medida que o preço diminui e vice-versa.

2.3.2 Oferta

Oferta é a curva que mostra o desejo ou a capacidade dos produtores em ofertar uma determinada mercadoria por um determinado preço durante um período de tempo especificado. O comportamento em que a disponibilidade de bens aumenta com o aumento do preço dos mesmos, denomina-se lei da oferta cuja representação está no Gráfico 2.2, no qual O indica a oferta inicial, O_- indica diminuição da oferta e O_+ indica o aumento da oferta [13]. Variações de oferta provocam o movimento da curva de oferta. Contudo, como a capacidade de produção é limitada, ela apresenta um crescimento acelerado quando se aproxima da capacidade máxima.

Gráfico 2.2 - Curva de oferta

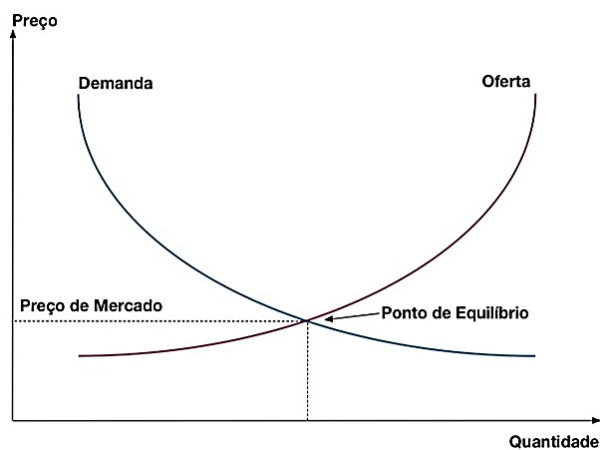


Fonte: Adaptado de [13]

2.3.3 Preço De Mercado

Quando compradores e vendedores se encontram em um determinado mercado para comercializar suas mercadorias livremente e de forma competitiva, as curvas de oferta e demanda automaticamente se ajustam até encontrar um ponto de equilíbrio que determina o preço de mercado, conforme mostra o Gráfico 2.3 [13].

Gráfico 2.3 - Oferta X Demanda

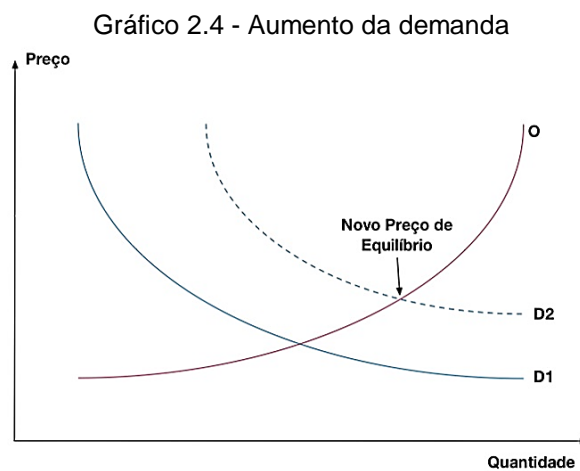


Fonte: Adaptado de [13]

Portanto, num mercado livre o preço das mercadorias não pode ser determinado arbitrariamente por nenhum dos fornecedores, nem por nenhum dos consumidores e nem pelo governo.

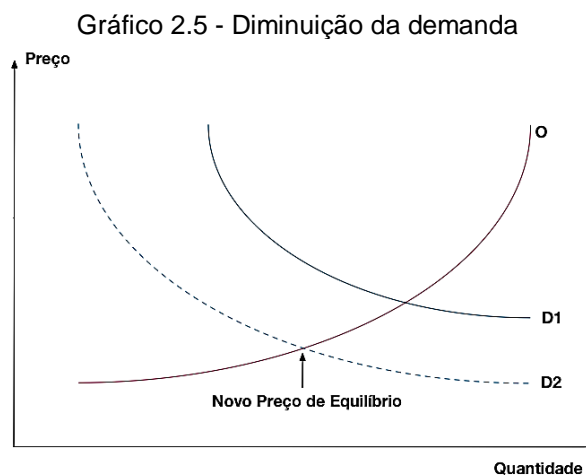
Mudanças na oferta ou na demanda provocam variações no ponto de equilíbrio conforme mostrado do Gráfico 2.4 ao Gráfico 2.7

O Gráfico 2.4 mostra que ao ocorrer o aumento da demanda, por qualquer razão externa, a curva de demanda se desloca e um novo preço de equilíbrio, com preço e quantidade maiores, é encontrado [14].



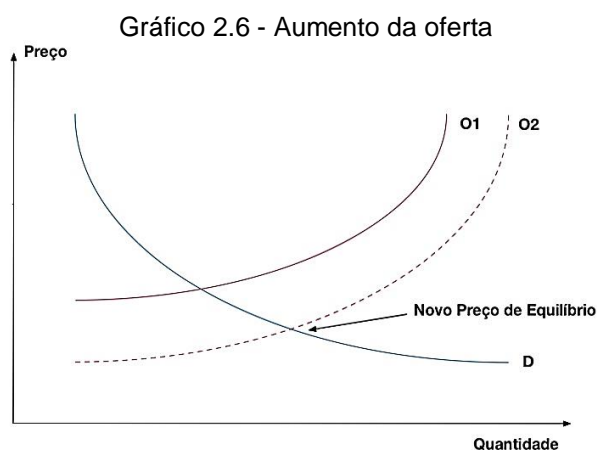
Fonte: Adaptado de [13]

Por outro lado, o Gráfico 2.5 mostra exatamente o inverso, uma redução na demanda. Quando isto ocorre, o mercado encontra um novo ponto de equilíbrio com preço e quantidade menores [13].



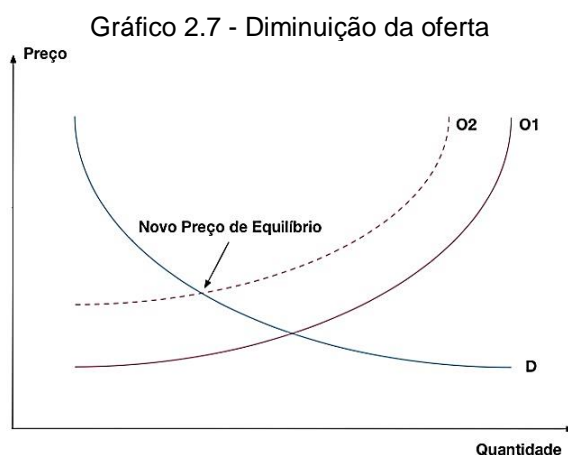
Fonte: Adaptado de [13]

Por sua vez, o Gráfico 2.6 e o Gráfico 2.7 mostram o comportamento do preço de equilíbrio para variações na oferta. Um aumento na oferta provoca um aumento na quantidade vendida mas com uma redução no preço [14].



Fonte: Adaptado de [13]

Por outro lado, uma diminuição na oferta provoca a redução na quantidade comercializada e um aumento no preço de equilíbrio, conforme mostra o Gráfico 2.7.

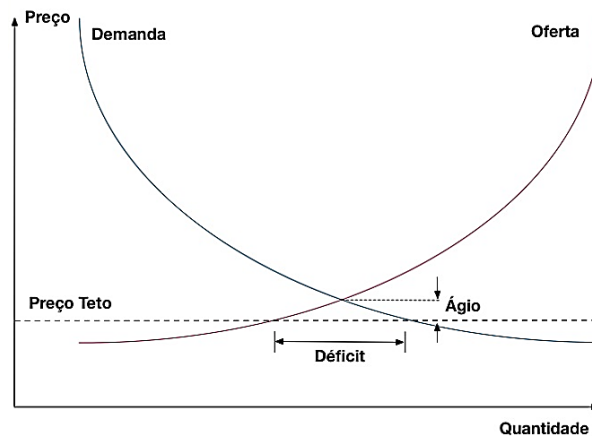


Fonte: Adaptado de [13]

Quando esses comportamentos básicos da teoria econômica não são corretamente compreendidos resultados catastróficos são obtidos. Um comportamento muito comum é o estabelecimento de preços máximos ou controlados para determinados produtos pelo governo. Apesar da ideia parecer atraente para políticos e para a população em geral, os resultados práticos são piores do que deixar o mercado encontrar seu novo ponto de equilíbrio. O Gráfico 2.8 mostra as

consequências do estabelecimento de preços teto no mercado. Como o preço teto sempre é inferior ao preço de equilíbrio, seu estabelecimento leva à escassez de mercadorias [14].

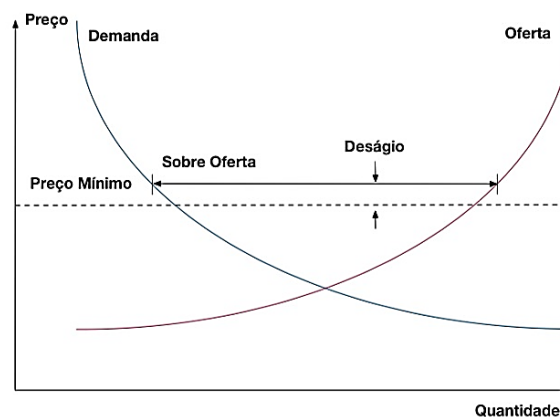
Gráfico 2.8 - Consequências do estabelecimento de preços teto no mercado



Fonte: Adaptado de [13]

No entanto, independentemente do impacto do novo preço de equilíbrio, o ajuste via forças de mercado é sempre mais eficiente e menos custoso à sociedade do que qualquer outra forma de intervencionismo. Situação oposta ocorre quando se tenta estabelecer preços mínimos. Esta prática, muito comum com preços de produtos agrícolas, é sempre justificada para proteger os produtores. No entanto, ela não os protege porque o estabelecimento de preço mínimo superior ao preço de equilíbrio de mercado leva a uma sobre oferta de mercadorias, Gráfico 2.9 [14].

Gráfico 2.9 - Tentativa de estabelecer preços mínimos



Fonte: Adaptado de [13]

Assim como no caso anterior, essa sobre oferta é rapidamente contornada pelas forças de mercado através de descontos especiais ou outras formas de redução de preço.

2.3.4 Elasticidade

Conforme citado nos itens anteriores, os produtores e consumidores são sensíveis às variações de preço, esta sensibilidade é medida pela elasticidade, que é definida através das equações (1) e (2) [13]:

$$E_d = \left| \frac{\Delta Q_d}{Q_d} \cdot \frac{P}{\Delta P} \right| \quad (1)$$

$$E_o = \frac{\Delta Q_o}{Q_o} \cdot \frac{P}{\Delta P} \quad (2)$$

A demanda ou oferta é considerada elástica quando a variação percentual do preço provoca variação percentual maior na quantidade. Isto ocorre sempre que E_d/E_o for maior do que 1. Por outro lado, a demanda ou oferta é considerada inelástica quando ocorre o contrário, isto é, sempre que E_d/E_o for menor do que 1. No caso limite de E_d ser igual a 1, diz-se que a elasticidade é unitária.

É importante ressaltar que quando a demanda é inelástica os consumidores continuam sensíveis à variação de preço, porém em menor grau. No caso extremo dos consumidores serem totalmente insensíveis às variações de preço, diz-se que a demanda é perfeitamente inelástica e, neste caso, E_d é igual a zero. Por outro lado, quando a demanda é perfeitamente elástica, E_d é igual a infinito, e a quantidade demanda pode variar de zero até o máximo com pequenas variações de preço.

A elasticidade é extremamente importante para empresas e o governo estabelecerem suas estratégias. O faturamento é máximo quando a elasticidade é unitária. Além disso, quando a demanda é elástica, diminuições de preço aumentam o consumo e o faturamento total. Por outro lado, quando a demanda é inelástica, diminuições de preço provocam a diminuição da receita total. Isto significa que, dependendo da elasticidade do produto, aumentar o preço de venda reduz a receita.

2.3.5 Custo Fixo

É o custo que não depende do nível de produção. Inclui o custo do capital empregado, o aluguel das instalações, os gastos com administração, entre outros. O custo fixo médio ou unitário é o custo fixo dividido pelo número de unidades produzidas, em outras palavras, é a fração do custo fixo associada com cada unidade produzida [14].

2.3.6 Custo Variável

É o custo que tem relação e dependência com o volume de produção. No caso da geração de energia termelétrica o principal custo variável é o custo do combustível. Para centrais eólicas ou hidroelétricas, o custo variável ou é zero ou é muito próximo de zero. O custo variável médio é a fração do custo variável total associado a cada unidade produzida [14].

2.3.7 Custo Marginal

É o custo variável associado à fabricação de uma unidade adicional do produto. No caso de uma planta de geração de eletricidade, o custo marginal é o custo de se produzir mais um MWh, que, por sua vez, costuma ser função basicamente do custo variável unitário do recurso energético utilizado no processo de produção [14].

2.4 MINIRREDES

Este tópico apresenta os principais conceitos e a situação atual das minirredes elétricas, bem como analisa as barreiras encontradas para sua integração à rede elétrica com relação ao despacho de energia.

Uma minirrede elétrica é composta por uma ou mais fontes de energia associadas a uma carga, e pode operar de forma independente ou conectada à rede principal, sendo vista pelo resto do sistema como uma unidade controlada individualmente.

O conceito de minirrede foi originalmente desenvolvido dentro do CERTS nos Estados Unidos.

A classificação das minirredes mudam entre as entidades normativas e estudiosos. A denominação também muda, uma minirrede no Brasil pode ser considerada uma microrrede em outro país [15]:

- para o EPRI: de uns poucos quilowatts até 50 MW;
- para o *Gas Research Institute*, de Chicago – EUA: tipicamente de 25 kW a 25 MW;
- para o CIGRE: inferior a 50 – 100 MW;

No Brasil a Resolução Normativa Nº 687 da ANEEL apresenta valores de potência diferentes para as minirredes, além disso o conceito de geração distribuída é dividido entre microgeração e minigeração [7]:

- “Microgeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 75 kW e que utilize cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, ou fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras.” Neste caso existe, uma microrrede conectando os equipamentos da microgeração.
- “Minigeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 3 MW para fontes hídricas ou menor ou igual a 5 MW para cogeração qualificada⁷, conforme regulamentação da ANEEL, ou para as demais fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras.” Neste caso existe, uma minirrede conectando os equipamentos da microgeração.

As faixas de potências que seriam consideradas microrredes em outras partes do mundo, são classificadas como minirredes no Brasil. Além disso não estão especificadas quais as fontes de energia integram e como a minirrede é vista pelo sistema da Concessionária.

A Resolução Normativa Nº 687 da ANEEL também contém importantes inovações: a possibilidade de instalação de geração distribuída em condomínios e a possibilidade da união de diversos interessados em um consórcio ou cooperativa.

⁷ Atributo concedido a cogeneradores que atendem os requisitos definidos na Resolução Normativa nº 235 de 14/11/2006.

No caso de empreendimento de múltiplas unidades consumidoras, será possível aos condôminos instalar um sistema de microgeração ou minigeração distribuída no condomínio e utilizar os créditos para diminuir a fatura de suas unidades consumidoras. Esses créditos poderão ser divididos em porcentagens previamente acordadas.

Na geração compartilhada, o consórcio ou cooperativa seria titular de uma unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída e definiria, segundo critério próprio estabelecido entre os integrantes, o percentual da energia excedente que seria destinado a cada unidade consumidora que compõe o consórcio ou cooperativa.

As minirredes tem potencial para lidar com vários problemas, oferecendo vantagens tais como [16]:

- Maior confiabilidade e qualidade da tensão, evitando a perda total de energia durante distúrbios e blecautes em sistemas e redes contendo cargas críticas e cargas normais.
- Aumento da segurança no sistema contra-ataques terroristas ou proteção contra-ataques cibernéticos e desastres naturais pelo fato de utilizar e promover o uso de fontes de energia dispersa.
- Possibilidade de adiar altos investimentos em ampliação do transporte e geração de energia.
- Redução de impacto ambiental.
- Maior flexibilidade operacional do sistema elétrico.
- Outra vantagem adicional da produção de energia local é a otimização de sistemas de cogeração térmicos.

No entanto as minirredes apresentam também desvantagens, as quais podem-se destacar:

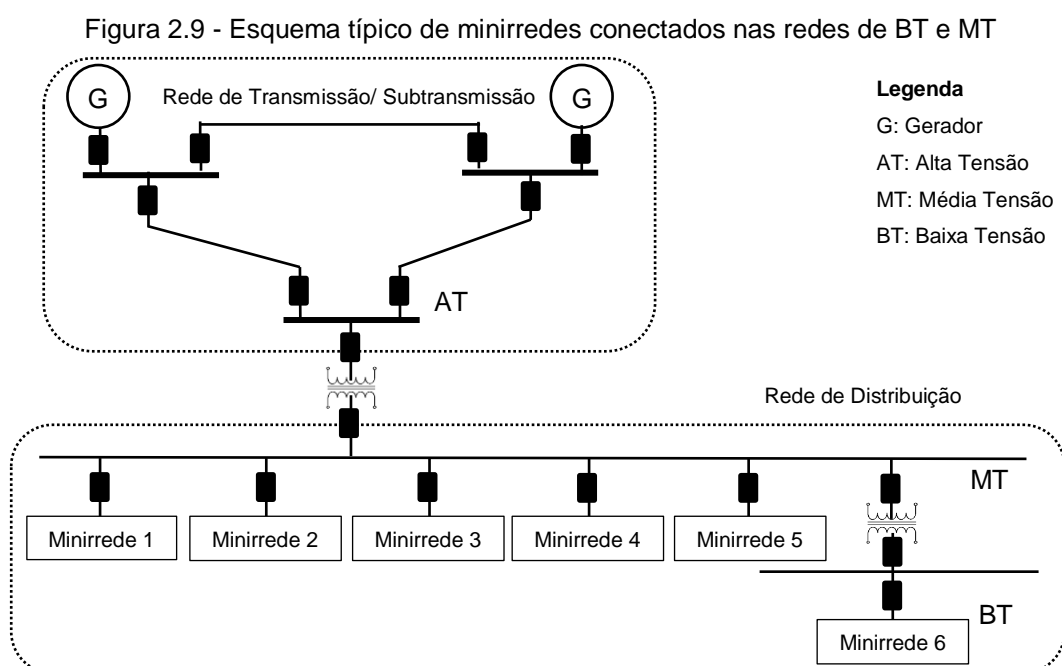
- Dificuldades técnicas em relação à comunicação de dados.
- Investimento na construção de unidades microgeradoras e longo período de *payback*.
- Falta de padrões e regulamentações.

Uma minirrede pode operar fora ou conectada à rede elétrica da Concessionária. Os sistemas que operam interligados com a rede são denominados

on-grid, e aqueles que operam desconectados da rede são conhecidos como sistemas *off-grid*. Entretanto esses modos de operação podem alternar entre si em função das condições existentes no sistema ou da necessidade do consumidor, logo a mesma *minirrede* também pode operar nos seguintes modos [17]:

- Modo de ilhamento pré-planejado (intencional) ou *off-grid*: precisam de baterias para fornecer energia em períodos nos quais a geração por meio das fontes alternativas não é suficiente para suprir a carga, assegurando com isso a continuidade do fornecimento. Normalmente esse tipo de sistema é usado em locais não atendidos por uma rede elétrica;
- Modo de operação normal ou conectado à rede principal, ou *on-grid*: possibilita que a carga seja atendida pela geração de várias fontes de energia. Caso a produção de energia tenha excedente, este pode ser injetado na rede, dando origem a créditos para o Consumidor;
- Modo de ilhamento forçado (não intencional): ocorre principalmente devido à presença de faltas no sistema ou a outros tipos de transitórios não previstos, tais como quedas de tensão severas ou blecautes.

Uma minirrede pode ser construída com variadas topologias, a Figura 2.9 ilustra um exemplo de uma minirrede conectada ao sistema elétrico [5].



Fonte: Adaptado de [5]

Na Figura 2.9, as minirredes estão conectadas em MT e BT. Nota-se que não é necessário que os geradores estejam concentrados em um único local [18].

A escolha sobre qual fonte de energia elétrica utilizar depende da disponibilidade do recurso na área de implementação da minirrede. As principais fontes de energia elétrica utilizadas são: sistemas de energia e calor combinados, microturbinas, células de combustível, geradores eólicos, geradores fotovoltaicos e pequenas centrais hidrelétricas [19]. No presente trabalho, foram utilizadas apenas as fontes eólica, solar e termelétrica a diesel.

Conforme apresentado o conceito de minirrede é amplo, pois, além de possuir uma topologia de operação flexível com fluxo de potência em ambos os sentidos, os consumidores podem assumir papéis de agentes ativos, com capacidade de consumir, gerenciar e gerar energia elétrica ou outra forma de energia, tendo um alto nível de automação, mantendo o controle de tensão e frequência. O armazenamento de energia e cargas requerem uma interface que garanta a compatibilidade com a rede de distribuição local ou principal. Essa interface inclui equipamentos de proteção, medição local e desconexão para garantir a estabilidade da minirrede; podendo incluir conversores de frequência e inversores de energia, ou uma mistura dos mesmos quando o dispositivo a conectar com a rede de distribuição trabalha em corrente contínua e a rede em corrente alternada, ou quando o dispositivo e a rede trabalham em corrente alternada com frequências diferentes [16] .

Portanto, o despacho de energia elétrica das minirredes deve considerar variações da carga, se a fonte é despachável ou intermitente, a disponibilidade da rede e sistemas de armazenamento de energia, o que torna o problema não linear e dependente do tempo.

2.4.1 Equipamentos das minirredes simuladas

2.4.1.1 Sistemas armazenadores de energia

Devido a operação intermitente das fontes renováveis de energia é fundamental instalar um sistema de armazenamento de energia elétrica nas minirredes, tanto para manter a estabilidade do sistema como para facilitar a integração entre diferentes fontes de energia. Este sistema também pode melhorar a

qualidade de energia, realizar o gerenciamento de energia no usuário final, controlar a frequência e tensão, e reservar energia para aproveitamento futuro, aumentando assim a eficiência do sistema.

As opções para armazenar energia podem ser divididas em três categorias principais, que se referem à física por trás do procedimento de armazenamento [20]:

- Elétrica: capacitores
- Eletroquímica: baterias
- Mecânica: *flywheels* e *pumped storage*

Entre todas as tecnologias disponíveis para utilização em minirredes, os bancos de baterias são as mais utilizadas para armazenamento de energia. A potência e a energia que estas são capazes de fornecer são dependentes uma da outra e, por isso, durante o seu dimensionamento, são fixados os valores que se querem atingir para estas grandezas.

O dimensionamento de uma bateria vai depender do número de células que a constituem e da forma como estas serão ligadas. Os níveis de tensão e de corrente desejados numa bateria são conseguidos, aumentando ou reduzindo o número de células ligadas em série e paralelo, respectivamente. Para selecionar o tipo de bateria e desenvolver o modelo do sistema de supervisão e estimação do estado da bateria, além das informações citadas, podem ser considerar as seguintes características [20]:

- Estado de carga, SOC (%): É a relação entre a tensão máxima esperada nos terminais da bateria e a tensão atual, ou seja, o SOC informa a capacidade que pode ser descarregada da bateria em certo momento. O estado de carga de uma bateria nunca deve ir abaixo dos 50% pois isso irá danificá-la, podendo mesmo inutilizá-la. Um estado de carga de 100% significa que a bateria está totalmente carregada.
- P_B : É a quantidade total de potência que a bateria pode armazenar para uma determinada taxa de descarga, a qual será injetada na minirrede.
- Ciclo de vida: É a contagem do número total de vezes que a bateria pode ser carregada (e descarregada) durante a sua vida útil. Quando a bateria não consegue ser carregada acima de 80% do seu estado de carga nominal, então considera-se que a sua vida útil chegou ao fim.

- Profundidade de descarga (%): É a relação entre a quantidade de corrente por hora (Ah) removida a partir de uma célula da bateria e a carga nominal (Ah) da mesma. Esta é definida como 0% quando a bateria está totalmente carregada e 100% quando está totalmente descarregada.

Em princípio, o ciclo de carga-descarga pode ser repetido indefinidamente. Na prática, existem limitações para o seu número máximo, uma vez que os eletrodos perdem parte do material com cada descarga. As sucessivas descargas traduzem-se em uma diminuição progressiva da capacidade da bateria, como consequência da perda de material ativo da mesma. Naturalmente, essa perda é tanto mais intensa quanto maior for o número de ciclos e a profundidade de descarga. A diferença de funcionamento entre os diversos tipos de baterias está relacionada aos diferentes eletrólitos e eletrodos metálicos. Para um mesmo tipo de bateria, a diferença de funcionamento é o resultado do método de fabricação [21].

Por este motivo, a capacidade nominal da bateria deve ser sempre especificada em função do tempo de descarga para o qual a capacidade nominal da bateria é expressa, conjuntamente com a respectiva corrente de descarga. Atendendo a que o comportamento das baterias é não linear, não basta apenas referenciá-la através do valor da sua capacidade. No capítulo 3, é apresentado o modelamento e no capítulo 4 pode ser verificado como o sistema de armazenamento foi escolhido.

2.4.1.2 Sistema de Geração de Energia Solar

As três principais tecnologias para o aproveitamento da energia solar na produção de energia são a fotovoltaica, a termossolar e a solar termelétrica. Destas, a fotovoltaica é amplamente a mais utilizada, e por isso, será utilizada neste trabalho.

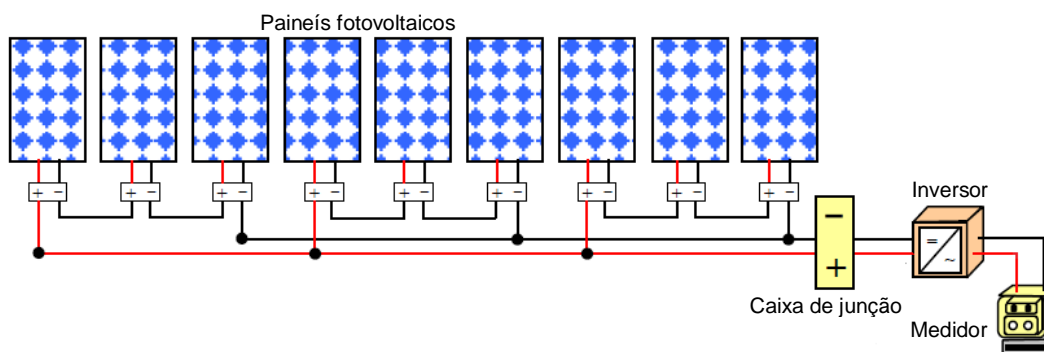
Os sistemas solares fotovoltaicos convertem a energia irradiada pelo sol diretamente em eletricidade e são considerados como uma grande fonte de energia renovável que não causa emissões de efeito estufa ou consumo de combustível durante sua operação [22]. Pela sua simplicidade, modularidade, flexibilidade, segurança e abundante recurso solar, é dito que estes sistemas representam uma fonte de energia importante para o futuro. Este tipo de sistema é composto, principalmente, de um conjunto de módulos solares ligados ao resto do sistema por meio de uma interface de conexão. O painel ou módulo solar é o dispositivo básico

dos sistemas fotovoltaicos, normalmente contém um conjunto de células fotovoltaicas ligadas em série ou paralelo e proteções. Esta célula opera sob o efeito fotoelétrico e sua composição varia em função da tecnologia e do material com o qual ela é feita. Os tipos de painéis solares mais conhecidos e utilizados são feitos de silício, mas existem módulos baseados em cádmio, e gálio cobre entre outros [23]. A Figura 2.10 apresenta os principais componentes de um sistema de geração de energia solar.

Em relação às questões ambientais, pode-se afirmar que a tecnologia solar fotovoltaica não gera qualquer tipo de efluentes sólidos, líquidos ou gasosos durante o processo de produção da eletricidade, sendo seus impactos restritos ao visual e à ocupação de áreas. Trata-se de uma tecnologia que não emite ruídos nem utiliza recursos naturais esgotáveis.

Dentro desse tema, há dois tópicos que ainda permanecem em discussão: a emissão de poluentes e gastos energéticos durante o processo de fabricação dos módulos e as reais possibilidades de reciclagem dos mesmos, depois de terminada sua vida útil. A indústria fotovoltaica emprega alguns gases tóxicos e líquidos corrosivos, cuja presença e a quantidade desses materiais dependem do tipo de célula que está sendo produzida [24].

Figura 2.10 - Principais componentes de um sistema de geração de energia solar



Fonte: Autor

As principais desvantagens da aplicação de sistemas fotovoltaicos estão relacionadas com a descontinuidade da radiação solar, os altos custos de investimento inicial e a baixa eficiência na conversão de energia, ou seja, a tecnologia atual requer quantidades grandes de terra para quantidades pequenas de geração da energia [16].

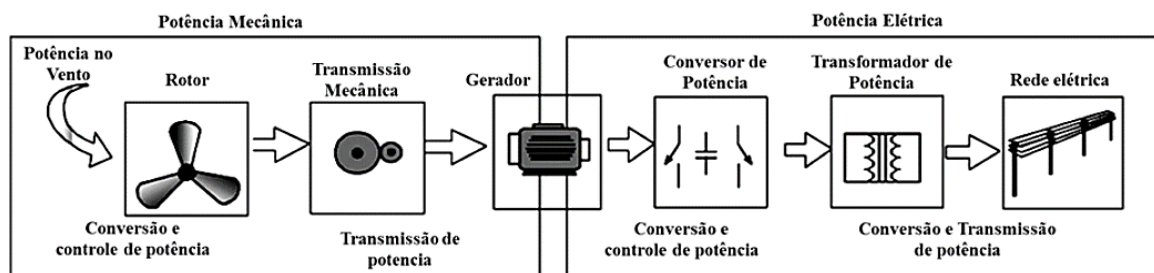
A variável mais importante para elaborar estudos do potencial de produção de energia solar ou um projeto de geração de energia solar, é a irradiação I_{solar} . Através deste dado é obtida P_s [25]. No capítulo 3 é apresentado o modelamento e no capítulo 4 estão apresentados os critérios utilizados neste trabalho para selecionar o sistema de energia solar adotado.

2.4.1.3 Sistema de Geração de Energia Eólica

A energia eólica é resultado da energia cinética do ar em movimento, captada por turbinas, cujo rotor está ligado a um gerador elétrico, diretamente ou por intermédio de uma caixa de engrenagens. Os principais componentes de um sistema eólico estão apresentados na Figura 2.11, incluindo o rotor da turbina, transmissão mecânica, transformador e equipamento eletrônico de potência.

Os sistemas eólicos podem ser instalados em terra, *onshore*, ou no mar, *offshore*. Os sistemas instalados no mar apresentam a vantagem de aproveitarem ventos normalmente mais favoráveis, no entanto, enfrentam dificuldades de fixação e manutenção por isso são mais onerosas [23].

Figura 2.11 - Principais componentes de um sistema eólico

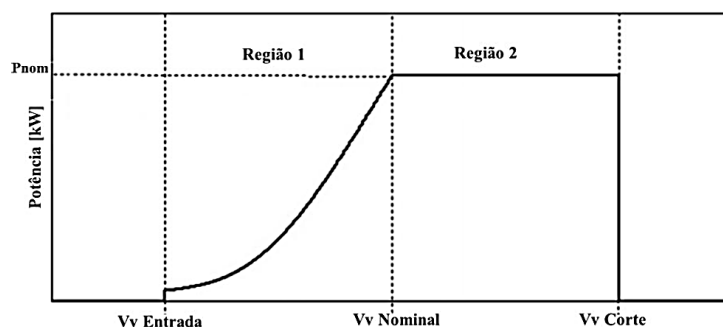


Fonte:[16]

O gráfico de operação da turbina, Gráfico 2.10, pode ser dividido em duas regiões: abaixo da velocidade do vento nominal e acima do mesmo. Na primeira região, a turbina funciona com rotor de velocidade variável deixando as pás da turbina com ângulo fixo para maximizar a potência gerada. Quando a velocidade do vento excede a velocidade do vento nominal da turbina, está entregue potência constante variando o ângulo das pás. Além disso, a turbina para de gerar energia elétrica quando a velocidade do vento é inferior à velocidade de entrada ou quando ultrapassa a

velocidade máxima suportada pela turbina (velocidade de corte) [26]. Este gráfico é importante para selecionar o modelo e o tipo da turbina, no capítulo 4 pode-se verificar este passo para seleção do modelo da turbina usada neste trabalho.

Gráfico 2.10 - Curva teórica de potência de uma turbina eólica



Fonte: Adaptado de [26]

O levantamento e a análise do potencial eólico são de extrema importância para garantir a elaboração de um projeto bem dimensionado e com menos riscos do vento danificar as turbinas durante fortes ventanias ou não girar durante dias. Outro fator importante a ser considerado é que as turbinas podem causar morte de pássaros, morcegos, ou insetos, além de desvios de rotas migratórias de pássaros. Este último impacto pode ser minimizado escolhendo locais para instalação de centrais eólicas fora das rotas de migração conhecidas [27].

No capítulo 3 é apresentado o modelamento e no capítulo 4 os critérios adotados para selecionar o sistema de energia eólico usado neste trabalho.

2.4.1.4 Sistema de Geração de Energia Termelétrica

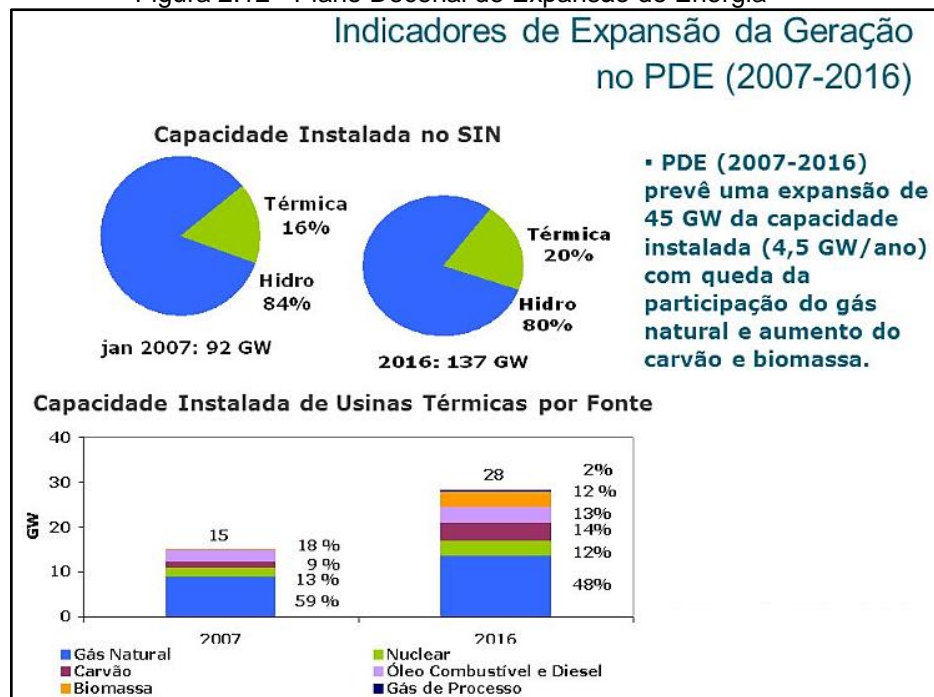
A energia termelétrica é gerada a partir da queima de combustíveis fósseis, como carvão mineral, gás natural, diesel entre outros ou a partir da biomassa, por exemplo, bagaço da cana.

As termelétricas diminuem a dependência brasileira das hidrelétricas. Também reduzem o risco de racionamento em caso de escassez de chuvas ou diminuição dos volumes de água nos reservatórios. Outra vantagem das termelétricas é que elas podem ser instaladas perto dos grandes centros consumidores, diminuindo assim as perdas de transmissão e melhorando a qualidade da energia fornecida [28].

Apesar da geração de energia no país ainda ser predominantemente de origem hídrica, a geração termelétrica vem aumentando nos últimos anos, devido a problemas climáticos. Os níveis de água nos reservatórios do país estão ficando abaixo do normal com uma frequência maior devido aos longos períodos de seca, provocados pelo *El niño*. Paralelamente o crescimento populacional e econômico aumentaram a demanda de energia elétrica [22]. Portanto, a necessidade do despacho de unidades térmicas continua sendo necessária. Na Figura 2.12 [9] estão apresentados os indicadores da expansão da geração entre 2007 e 2016.

No capítulo 3 é apresentado o modelamento e no capítulo 4 os critérios adotados para selecionar o sistema de energia termelétrica usado neste trabalho.

Figura 2.12 - Plano Decenal de Expansão de Energia



Fonte: [9]

2.4.2 Investimentos para geração de energia elétrica

O investimento na cadeia de produção da eletricidade abrange três segmentos principais: geração, transmissão e distribuição. Como este trabalho aborda o despacho de energia elétrica, foram verificados os custos referentes a fase de geração.

Na fase de geração o investimento está ligado à implantação das novas usinas, variando de acordo com a fonte utilizada e, portanto, com a estratégia de expansão adotada. Os custos de referência por fonte estão na Tabela 2.1 [9].

Tabela 2.1 - Custos de investimento referenciais na geração de energia elétrica

Fonte de Geração	US\$/kW
Hidrelétrica ¹	1.300
Cogeração a partir da biomassa da cana	900
Térmicas a diesel	500
Centrais solares	3600
Centrais eólicas	1.200
Centrais nucleares	2.200
Outras usinas ²	500

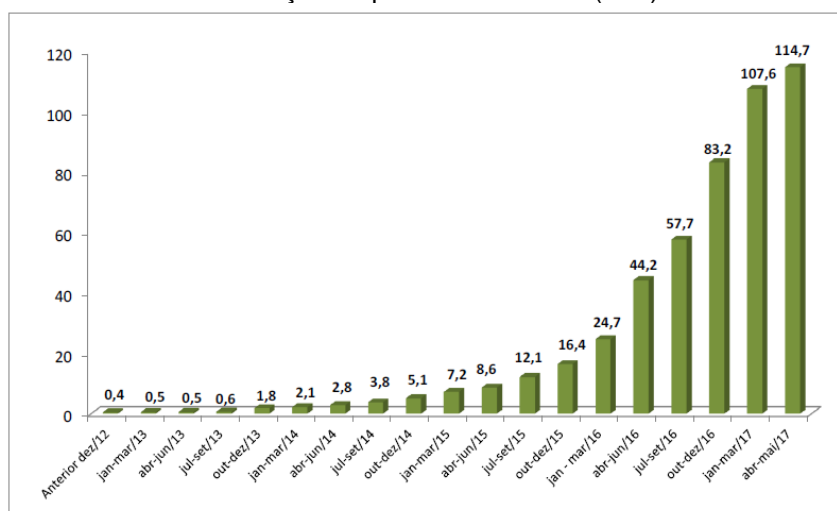
Notas: 1) Valor médio, considerando a instalação de 88.200 MW; 2) Instalações nos sistemas isolados remanescentes (predominantemente motores diesel).

Fonte: Adaptado de [9]

2.4.3 Panorama das Minirredes

Após a publicação da Resolução Normativa N° 482 da ANEEL, iniciou-se no país o processo de difusão de micro e minigeradores distribuídos, o qual começou a acelerar a partir de 2016. O Gráfico 2.11 apresenta a evolução da potência instalada desde 2012, evidenciando o forte crescimento em 2016, com aumento de 407% em relação a 2015 [29].

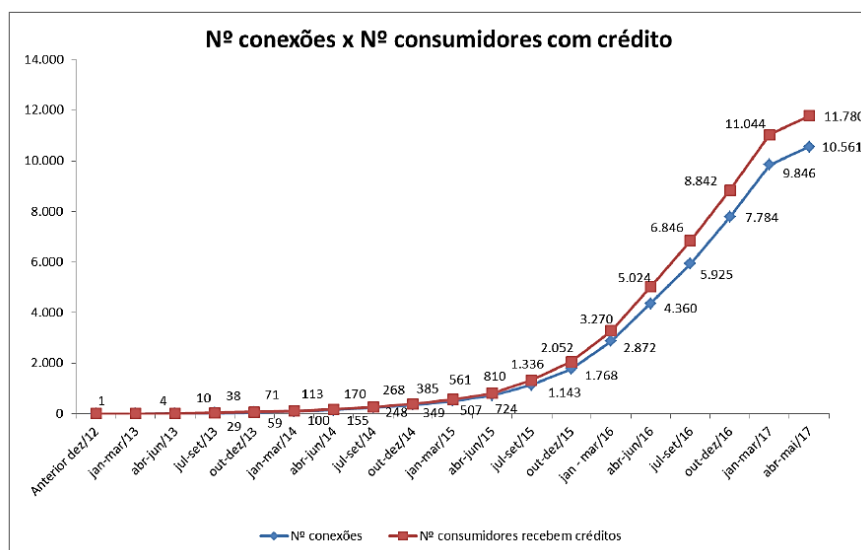
Gráfico 2.11 - Evolução da potência instalada (MW) até 23/05/17



Fonte: [29]

O Gráfico 2.12 apresenta os valores acumulados de conexões e consumidores que recebem os créditos de micro e minigeração distribuída até o dia 23/05/2017 [29].

Gráfico 2.12 - Número de micro e minigeradores até 23/05/2017



Fonte: [29]

O Gráfico 2.12 foi mantido por ter sido o último resultado apresentado em relatório pela ANEEL, e para demonstração da velocidade do crescimento da micro e minigeração nos últimos anos. Entretanto de acordo com acompanhamento online do site da ANEEL, o número de conexões de micro e minigeração, aumentou de maneira significativa nos últimos meses, atingindo em fevereiro de 2018 mais de 20 mil instalações, com atendimento a 30 mil unidades consumidoras, o que representa uma potência instalada de 247,30 MW; suficiente para atender 367 mil residências. A classe de consumo residencial é responsável por 58,71% de conexões, seguida da classe comercial com 35,25% das instalações.

Analisando os dados citados nos parágrafos anteriores percebe-se, que o crescimento da geração de energia com fontes renováveis tem sido 'exponencial', contudo 'pequeno' diante do potencial existente no Brasil. Isto se deve ao desconhecimento técnico da população, a poucas políticas de incentivo ao uso de fontes renováveis e a falta investimentos em pesquisa e desenvolvimento. Este último poderia alavancar o mercado de energia renovável, tornando mais fácil e viável a aquisição de sistemas de geração.

2.4.4 Estudos de Referência

Devido as características dos componentes das minirredes não possuírem comportamento linear, o problema do despacho econômico é complexo e deve ser representado como um problema de otimização onde a função objetivo é não linear.

Durante a revisão bibliográfica verificou-se que abordagens convencionais para resolução de problemas de despacho de energia incluem técnicas como: método iterativo, técnicas baseadas em gradiente, método dos pontos interiores, e programação dinâmica [30]. Entretanto, muitas das abordagens convencionais usadas em problemas de despacho econômico podem não ser aptas para providenciar uma solução ótima [31], [32].

A literatura tem apresentado alguns estudos referentes a utilização de metodologias de inteligência artificial para problemas de despacho econômico, tais como busca tabu e sistemas especialistas [33], [34], [35]. Neste contexto, as aplicações de técnicas de inteligência artificial usando principalmente a subárea de inteligência computacional, a citar as aplicações de redes neurais, algoritmos evolutivos ou evolucionários e sistemas híbridos inteligentes têm sido abordadas com sucesso devido a suas habilidades de buscar soluções próximas a solução ótima global [36], [37], [38], [39].

As alternativas citadas para resolver o problema do despacho econômico são complexas e demandam muito tempo de processamento, por isso na implementação dos casos de otimização estudados, empregou-se um software computacional poderoso e consolidado, o GAMS, que constitui uma ferramenta com capacidade para a determinação de soluções ótimas, tanto em problemas lineares como nos casos de não linearidade, permitindo, inclusive, trabalhar-se com grandes números de variáveis, constantes e restrições. Além disso o software permite que o processo de elaboração de um modelo seja independente do algoritmo a ser utilizado [40].

2.5 OTIMIZAÇÃO

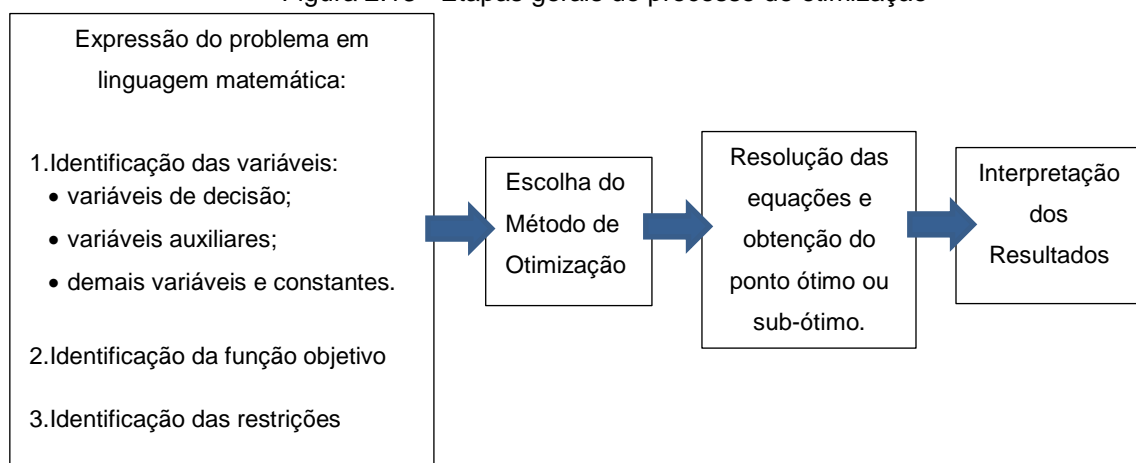
Neste item será apresentado de forma breve os principais conceitos de otimização usados na modelagem do despacho econômico de energia elétrica, que se trata de um problema de otimização não linear.

2.5.1 Conceito de otimização

A otimização de sistemas pode ser definida como o campo da matemática dedicado ao desenvolvimento de métodos eficientes de determinação de máximos e mínimos de funções de uma ou mais variáveis. A formulação de um problema de otimização contém os seguintes itens [41]:

- Variáveis de decisão: são as variáveis independentes que aparecem na função objetivo, indicando o grau de liberdade do sistema.
- Função objetivo: é a função matemática cujo máximo ou mínimo deseja-se determinar. Todo problema de otimização tem pelo menos uma função objetivo a ser alcançada.
- Restrições: são os limites impostos ao sistema ou estabelecidos pelas leis naturais que governam o comportamento do sistema, a que estão sujeitas as variáveis de decisão. As restrições podem ser de igualdade ou de desigualdade. Em um problema de otimização com restrições, ou seja um problema restrito, todas as restrições devem ser atendidas.
- Região de busca ou região viável ou região factível: é a região do espaço definido pelas variáveis de decisão, delimitada pelas restrições, cujo interior ou cuja fronteira se localiza o ponto ótimo da função objetivo, ou seja a solução encontrada deve pertencer à região viável.

Figura 2.13 - Etapas gerais do processo de otimização



Fonte: Autor

Das etapas apresentadas na Figura 2.13, a formulação matemática do problema é a mais crítica porque as demais etapas dependem dela; e mais difícil pois requer um profundo conhecimento do sistema a ser otimizado, e o levantamento de informações nem sempre disponíveis ou quantificáveis de maneira precisa, motivo pelo qual este trabalho abordou no referencial teórico uma teoria abrangente à primeira vista.

2.5.2 Método do Gradiente Reduzido Generalizado

O método de otimização é escolhido de acordo com as características da função objetivo e das restrições, pois estas indicam o tipo de problema de otimização.

De modo geral os problemas de otimização são classificados em linear e não-linear. Um problema é linear quando a função objetivo e as restrições são lineares com relação às variáveis de projeto. Para que um problema seja caracterizado como não-linear, este deve apresentar uma função objetivo não linear, ou pelo menos uma das restrições caracterizada por uma função não linear [41]. No caso do despacho econômico o problema de otimização é não linear.

O método do gradiente generalizado reduzido, GRG é um dos métodos utilizados para resolver problemas de otimização não-linear. Este método está sendo tratado porque foi o método utilizado no *solver* CONOPT, utilizado neste trabalho. Em essência, o método define novas variáveis que são normais às restrições lineares ou linearizadas, e expressa o gradiente em termos desta base normal. O algoritmo GRG está apresentado a seguir [42]:

Passo 1: Escrever o problema segundo a forma padrão conforme apresentado nas equações (3) e (4).

$$\begin{aligned} \min f(x) \\ x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{sujeito a } h_j(x) = 0 \\ j = 1, \dots, m \end{aligned} \quad (4)$$

Se existirem inequações, as mesmas devem ser transformadas em equações utilizando variáveis fictícias.

Passo 2: Escolha das variáveis não-básicas e básicas.

- Definição da estimativa inicial de x viável, através do método de Newton
- Definição do valor inicial de γ , da taxa de diminuição de γ , das tolerâncias, do(s) critério(s) de parada e do número máximo de iterações.

Passo 3: Cálculo do gradiente reduzido, através das equações de (5) a (11).

$$g_R^k = \left[\frac{\partial f^k}{\partial x_i^k} \right] - \left[\frac{\partial h^k}{\partial x_i^k} \right]^T \left\{ \left[\frac{\partial h^k}{\partial x_D^k} \right]^{-1} \right\}^T \left[\frac{\partial f^k}{\partial x_D^k} \right] \quad (5)$$

$$h(x) = \begin{bmatrix} h_1(x) \\ \vdots \\ h_m(x) \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_m \\ x_{m+1} \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\left[\frac{\partial f(x)}{\partial x_D} \right]^T = [\nabla_{x_D}^T f] \left[\frac{\partial f(x)}{\partial x_1} \quad \dots \quad \frac{\partial f(x)}{\partial x_m} \right] \quad (8)$$

$$\left[\frac{\partial f(x)}{\partial x_1} \right]^T = [\nabla_{x_1}^T f] \left[\frac{\partial f(x)}{\partial x_{m+1}} \quad \dots \quad \frac{\partial f(x)}{\partial x_n} \right] \quad (9)$$

$$\left[\frac{\partial h(x)}{\partial x_D} \right] = \begin{bmatrix} \frac{\partial h_1(x)}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial h_1(x)}{\partial x_m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial h_m(x)}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial h_m(x)}{\partial x_m} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\left[\frac{\partial h(x)}{\partial x_i} \right] = \begin{bmatrix} \frac{\partial h_1(x)}{\partial x_{m+1}} & \dots & \frac{\partial h_1(x)}{\partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial h_m(x)}{\partial x_{m+1}} & \dots & \frac{\partial h_m(x)}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad (11)$$

Passo 4: Determinação da direção da variação das variáveis independentes, utilizando as equações (12) e (13).

- Para a primeira iteração, equação (12):

$$\Delta_i^k = -g_{R_i} \quad i = 1, \dots, n \quad (12)$$

- nas demais iterações a direção do incremento para as variáveis independentes é calculada utilizando a fórmula do gradiente conjugado de *Fletcher-Reeves*, equação (13):

$$\Delta_i^{k+1} = -g_R^{k+1} + \Delta_i^k \frac{(g_R^{k+1})^T (g_R^{k+1})}{(g_R^k)^T (g_R^k)} \quad (13)$$

Passo 5: Determinação da direção da variação das variáveis dependentes, usando a equação (14).

$$\Delta_D^k = - \left[\frac{\partial h^k}{\partial x_D} \right]^{-1} \left[\frac{\partial h^k}{\partial x_i} \right] \Delta_i^k \quad (14)$$

Passo 6: Determinação da magnitude da variação das variáveis independentes e dependentes, usando as equações (15) e (16).

$$x_i^{k+1} = x_i^k + \gamma^k \Delta_i^k \quad (15)$$

$$\tilde{x}_D^{k+1} = x_D^k + \gamma^k \Delta_D^k \quad (16)$$

Lembrando que \tilde{x}_D^{k+1} é um ponto de tentativa e γ^k é determinado por uma busca unidimensional.

Passo 7: Determinação da região viável a partir das variáveis dependentes, procurando um conjunto de \tilde{x}_D^{k+1} que satisfaz $h(x) = 0$, equação (17).

$$x_D^{k+1} = \tilde{x}_D^{k+1} - \left[\frac{\partial h(x_i^{k+1}, \tilde{x}_D^{k+1})}{\partial x_D^k} \right] h(x_i^{k+1}, \tilde{x}_D^{k+1}) \quad (17)$$

Passo 8: Verificação da convergência, na qual podem ocorrer várias situações tais como:

- (a) Se x_D^{k+1} é um ponto viável e $f(x_i^{k+1}, x_D^{k+1}) < f(x_i^k, x_D^k)$, deve-se adotar x^{k+1} e voltar para o passo 3.
- (b) Se x_D^{k+1} é um ponto viável, mas $f(x_i^{k+1}, x_D^{k+1}) \geq f(x_i^k, x_D^k)$, deve-se reduzir γ com relação ao valor anterior e voltar para o passo 6.
- (c) Caso no passo 6 não seja encontrado um x_D^{k+1} viável, deve-se reduzir γ com relação ao valor anterior, e retornar ao passo 6.
- (d) Caso as situações (b) e (c) ocorram após 2 ou 3 passagens, ou seja, o programa entrar em "loop" infinito, deve-se mudar as variáveis dependentes e independentes.

Passo 9: Critério de parada do programa - diferença absoluta entre dois valores consecutivos da função objetivo.

3 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

3 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

Neste capítulo é apresentada a formulação matemática utilizada para modelar o despacho econômico de energia elétrica das minirredes, o qual se caracteriza como um problema de otimização não linear.

3.1 MODELAGEM DO DESPACHO ECONÔMICO DE ENERGIA ELÉTRICA EM MINIRREDES

O principal objetivo de um sistema de energia elétrica é fornecer energia para as cargas existentes. Visando estudar as possibilidades para realizar este fornecimento de forma econômica, foi modelado o despacho econômico de energia elétrica em minirredes.

Para tanto é indispensável que as restrições de operação das minirredes e dos sistemas que as compõem sejam satisfeitas. Como resultado do atendimento aos objetivos, obtém-se as potências de saída de cada uma das unidades geradoras de energia consideradas. A função custo total da geração é obtida através da soma dos custos individuais de cada uma das unidades geradoras.

Para estudar o despacho econômico de energia elétrica em minirredes foram consideradas as seguintes configurações:

- CASO 1: Minirrede formada pela Concessionária e pelo Sistema de Armazenamento.
- CASO 2: Minirrede formada pela Concessionária, pelo Sistema de Geração de Energia Termelétrica, e pelo Sistema de Armazenamento.
- CASO 3: Minirrede formada pela Concessionária, pelo Sistema de Geração de Energia Termelétrica, pelo Sistema de Armazenamento, e pelo Sistema de Geração de Energia Solar.
- CASO 4: Minirrede formada pela Concessionária, pelo Sistema de Geração de Energia Termelétrica, pelo Sistema de Armazenamento, e pelo Sistema de Geração de Energia Eólica.
- CASO 5: Minirrede formada pela Concessionária, pelo Sistema de Geração de Energia Termelétrica, pelo Sistema de Armazenamento,

Sistema de Geração de Energia Eólica, e pelo Sistema de Geração de Energia Solar.

Quando um sistema é adequadamente planejado e operado, deve atender a alguns requisitos, por isso no processo de formulação das equações e implementação do despacho de energia elétrica das minirredes foram realizadas as seguintes considerações:

- Foi considerado um consumidor industrial hipotético, com demanda de 600 kWh, classificado como consumidor cativo.
- O horário das 18 horas as 20 horas foi considerado horário de ponta, as demais horas do dia foram consideradas horário fora de ponta.
- O intervalo de tempo considerado foi de um dia.
- Não foi considerada a possibilidade do consumidor negociar e adquirir eletricidade gerada através de fontes incentivadas, conforme citado no item 2.1.2 com relação ao consumidor especial.
- A minirrede deve buscar custos mínimos, logo a função objetivo será minimizada.
- Para este estudo foi considerado que os requisitos mínimos de qualidade de energia elétrica tais como: nível de tensão, confiabilidade e a frequência, foram atendidos.
- O esquema de negociação consiste na transferência de potência entre a rede principal e o consumidor e vice-versa, pois no Brasil quando a energia injetada na rede for maior que a consumida, o consumidor receberá um crédito em energia a ser utilizado para abater o consumo em outro posto tarifário ou na fatura dos meses subsequentes. Importante ressaltar que, para os consumidores do grupo A não há um valor mínimo a ser pago a título de energia, fato que ocorre com os consumidores do grupo B. Contudo, os consumidores do grupo A continuam sendo normalmente faturados pela demanda.
- O método aproximado, que é utilizado nesse trabalho, não representa o efeito das perdas na rede.

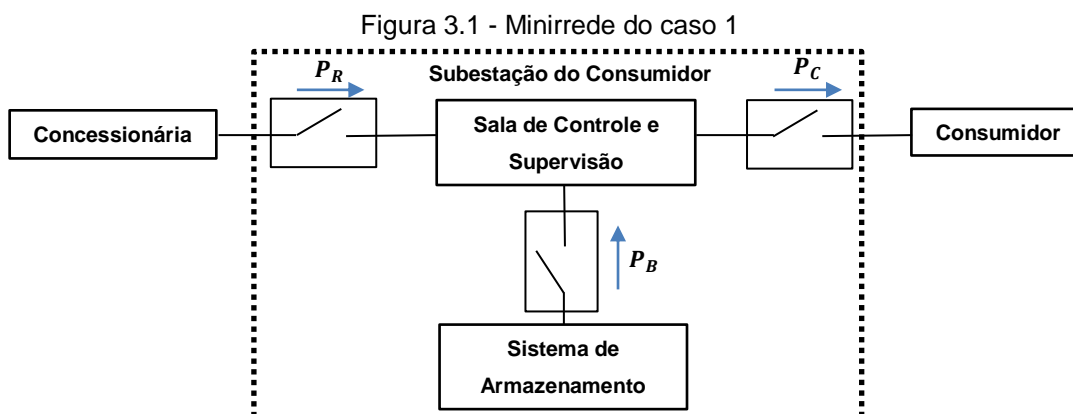
As restrições consideradas no processo de otimização das minirredes foram as seguintes:

- Balanço de potência: Uma restrição de igualdade deve ser satisfeita, a qual estabelece que a geração total deve suprir a carga total.
- Potências máxima e mínima da bateria: Considera-se os limites para as potências de carga e descarga da bateria.
- Armazenamento de energia da bateria: O estado de carga das baterias é item de suma importância para estender sua vida útil, pois nas baterias existem restrições de limites de energia. A realização da medição do estado de carga previne a bateria de sobrecargas e descargas profundas, ou até mesmo de ficarem muito tempo descarregadas.
- Armazenamento de energia máximo e mínimo da bateria: Consideram-se valores positivos para descarga da bateria e negativos para carga.
- Balanço de potência da bateria: para garantir maior eficiência e aumentar a vida útil das baterias.
- Limites da Geração termelétrica a diesel: Um gerador não opera indefinidamente, possuindo limites operacionais mínimo e máximo.

Para facilitar a leitura deste trabalho foi elaborada uma lista de símbolos, que se encontra na parte pré-textual.

3.1.1 CASO 1

A minirrede do caso 1 está apresentada na Figura 3.1, sendo formada pela Concessionária e pelo Sistema de Armazenamento. A função objetivo desta minirrede é dada pela equação (18).



Fonte: Autor

$$FO_1 = \sum_{t=1}^T \lambda_R(t) \cdot P_R(t) \quad (18)$$

As restrições da minirrede do caso 1 são dadas respectivamente pelas equações de (19) a (23). As características representadas pelas restrições estão esplanadas no item 2.4.1.1, deste trabalho.

O balanço de potência, equação (19), foi obtido através do cálculo do fluxo de potência na minirrede da Figura 3.1.

$$P_R(t) + P_B(t) = P_C \quad (19)$$

A equação (20) corresponde a restrição para as potências máxima e mínima da bateria.

$$P_{B_{min}} \leq P_B(t) \leq P_{B_{max}} \quad (20)$$

Na equação (21) está mostrada a restrição para armazenamento de energia da bateria.

$$SOC(t) = SOC(t-1) - P_B(t) \quad (21)$$

A equação (22) representa a restrição para limites máximo e mínimo do estado de carga.

$$SOC_{min} \leq SOC(t) \leq SOC_{max} \quad (22)$$

A restrição para o balanço de potência da bateria está apresentada pela equação (23).

$$\sum_{t=1}^T P_B(t) = 0 \quad (23)$$

3.1.2 CASO 2

Em um problema prático de despacho econômico com unidades térmicas, as funções de custo das unidades geradoras apresentam descontinuidades, devido a zonas de operação proibidas [35], pontos de válvulas de injeção, aos efeitos da multiplicidade de combustíveis, limites das rampas dos geradores, entre outros [43].

Porém por questões de simplicidade, nos problemas tradicionais de despacho econômico de unidades térmicas, a função de custo de cada unidade geradora tem sido aproximada por uma função quadrática, equação (24) [44].

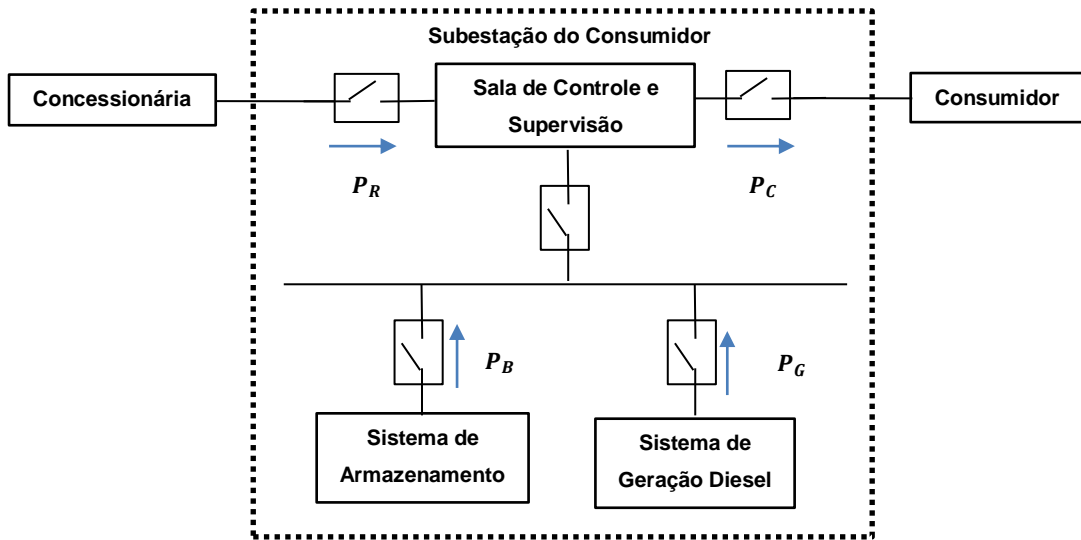
$$C_i(P_{Gi}) = a_i + b_i P_{Gi} + c_i P_{Gi}^2 \quad (24)$$

De forma que o somatório dos custos individuais de cada unidade se torna a função objetivo $C(P)$ para o problema sendo dada pela equação (25).

$$C(P_G) = \sum_{i=1}^n C_i(P_{Gi}) \quad (25)$$

A partir do modelo apresentado de despacho econômico, se obtém um conjunto de equações, tendo como incógnitas as potências nominais de cada gerador e o custo incremental, que representa o custo marginal para a operação desse sistema. A função objetivo da minirrede do caso 2 considera os elementos, apresentados na Figura 3.2, sendo dada pela equação (26).

Figura 3.2 - Minirrede do caso 2



Fonte: Autor

$$FO_2 = \sum_{t=1}^T \lambda_R(t) \cdot P_R(t) + C(P_G(t)) \quad (26)$$

As restrições da minirrede do caso 2 são dadas respectivamente pelas equações (20), (21), (22), (23), (27) e (28).

O balanço de potência, equação (27), foi obtido através do cálculo do fluxo de potência na minirrede, Figura 3.2.

$$P_R(t) + P_B(t) + P_G(t) = P_C \quad (27)$$

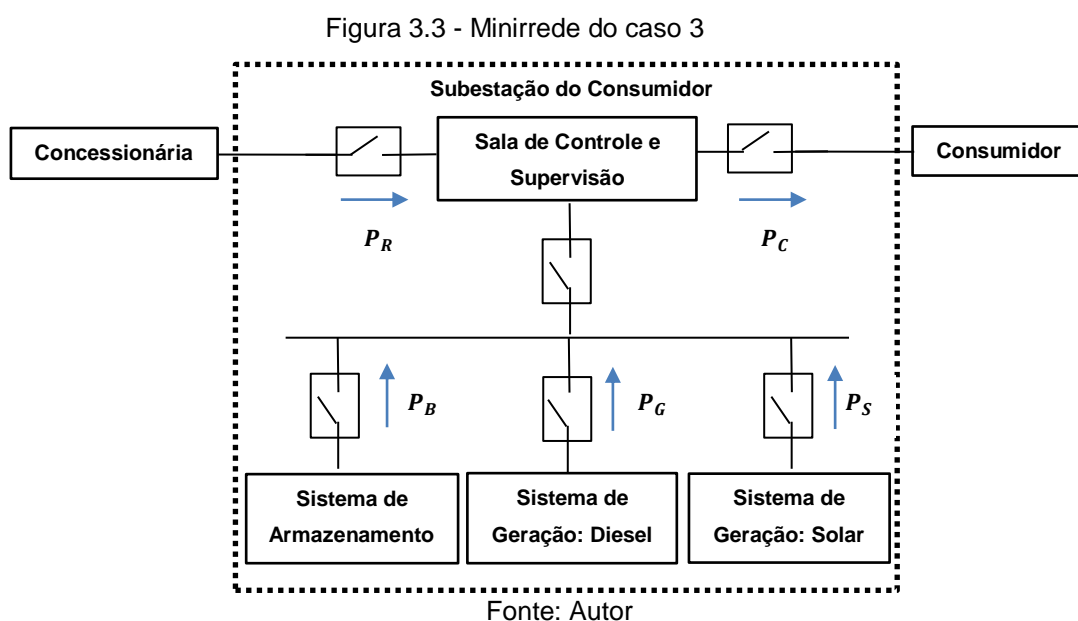
A restrição dada pela equação (28) corresponde aos limites da geração de energia termelétrica.

$$P_{G_{min}} \leq P_G(t) \leq P_{G_{máx}} \quad (28)$$

As restrições dadas pelas equações (20), (21), (22), (23), são as restrições do sistema de armazenamento, descrito no item 3.1.1.

3.1.3 CASO 3

A minirrede do caso 3 é formada pela Concessionária, pelo Sistema de Geração de Energia Termelétrica, pelo Sistema de Armazenamento, e pelo Sistema de Geração de Energia Solar. Na Figura 3.3 está apresentada a minirrede do caso 3.



A função objetivo da minirrede 3 é dada de forma geral pela equação (29).

$$FO_3 = \sum_{t=1}^T \lambda_R(t) \cdot P_R(t) + C(P_G(t)) + \sum_{t=1}^T \lambda_S(t) \cdot P_S(t) \quad (29)$$

Entretanto a Resolução Normativa Nº 687 da ANEEL apresentada no item 2.4 cita que os créditos recebidos de energia elétrica repassada para a rede, serão compensados ao consumidor em forma de desconto, ou seja não existe venda, apenas ‘empréstimo’ de potência. Logo, a parcela referente a energia solar não pode ser minimizada, por isso deve ser eliminada da função objetivo equação (29), mas deve ser considerada no balanço de potência. Outra consideração importante é que o modelo econômico do setor elétrico brasileiro é *tight pool* conforme apresentado no item 2.1.2, sendo o valor pago pela energia elétrica fixado, variando apenas com relação a horários determinados e de acordo com a classificação do consumidor. Caso os preços seguissem o comportamento econômico típico de mercado apresentado no item 2.3, existiriam diferentes valores de λ_R variando no tempo e de acordo com o tipo de fonte de energia. Logo a função objetivo para este caso é a mesma dada pela equação (26).

As restrições da minirrede do caso 3 são dadas respectivamente pelas equações (20), (21), (22), (23), (28) e (30).

O balanço de potência, equação (30), foi obtido através da análise da Figura 3.3.

$$P_R(t) + P_B(t) + P_G(t) + P_S(t) = P_C \quad (30)$$

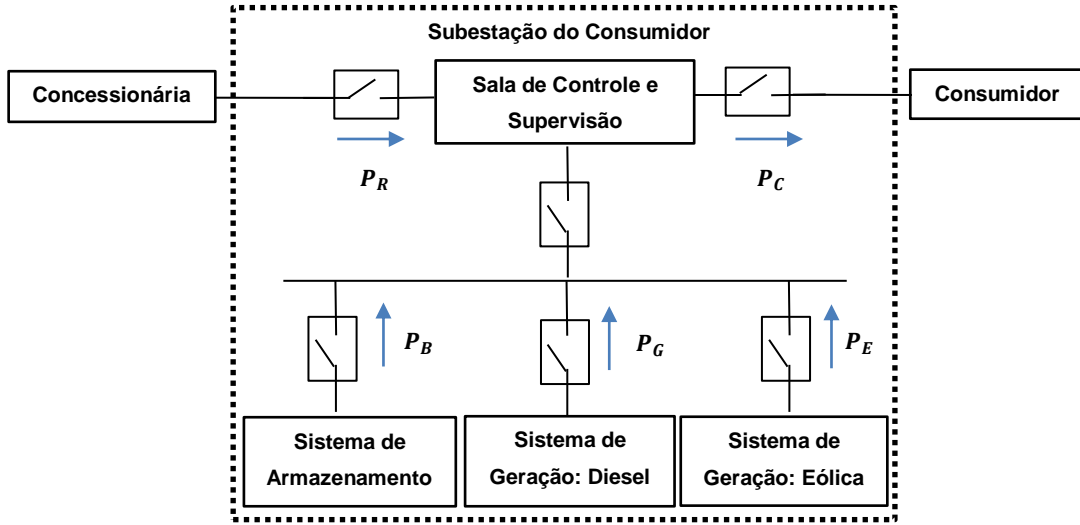
As restrições dadas pelas equações (20), (21), (22), (23), são as restrições do sistema de armazenamento, que foi o mesmo utilizado no item 3.1.1.

A restrição da equação (28) corresponde a restrição para o sistema de geração de energia termelétrica utilizado no item 3.1.2.

3.1.4 CASO 4

A minirrede do caso 4 está apresentada na Figura 3.4 sendo formada pela Concessionária, pelo Sistema de Geração de Energia Termelétrica, pelo Sistema de Armazenamento, e pelo Sistema de Geração de Energia Eólica.

Figura 3.4 - Minirrede do caso 4



Fonte: Autor

A função objetivo da minirrede do caso 4 é dada pela equação (31).

$$FO_4 = \sum_{t=1}^T \lambda_R(t) \cdot P_R(t) + C(P_G(t)) + \sum_{t=1}^T \lambda_E(t) \cdot P_E(t) \quad (31)$$

Entretanto a contribuição referente a energia eólica na equação (31), apresenta o mesmo comportamento de mercado citado para a energia solar no caso 3, e por isso não será considerada na formulação da função de objetivo. Portanto a função objetivo para este caso será a mesma dada pela equação (26).

As restrições da minirrede do caso 4 são dadas respectivamente pelas equações (20), (21), (22), (23), (28) e (32).

O balanço de potência, equação (32), foi obtido da análise da Figura 3.4.

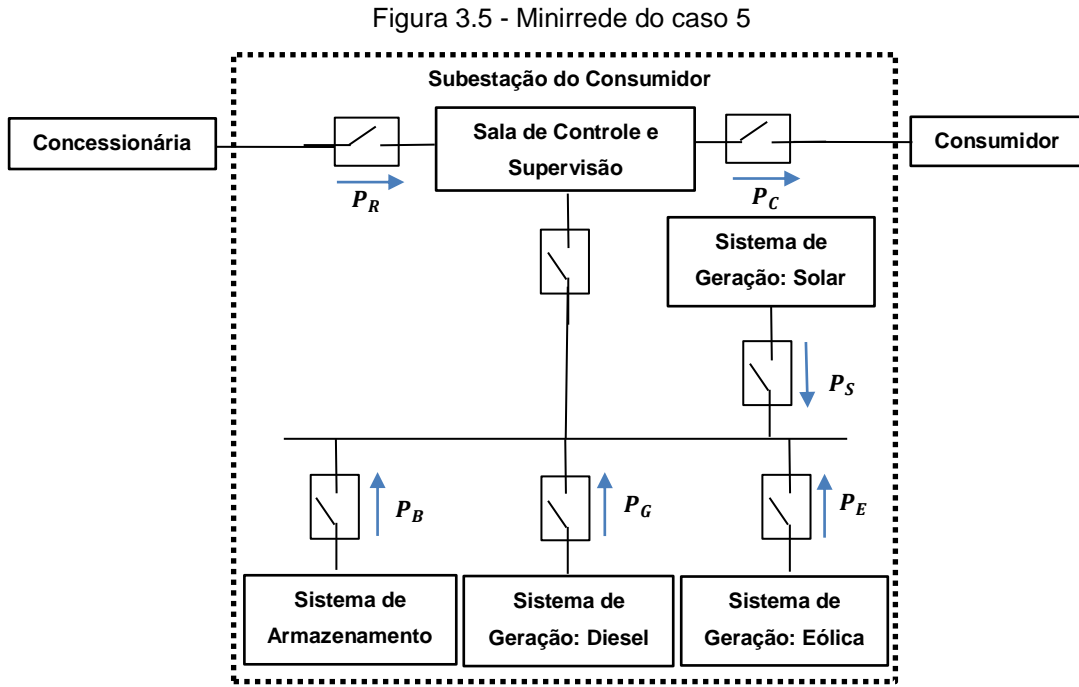
$$P_R(t) + P_B(t) + P_G(t) + P_E(t) = P_C \quad (32)$$

As restrições dadas pelas equações (20), (21), (22), (23), são as restrições do sistema de armazenamento, que foi o mesmo utilizado no item 3.1.1.

A restrição da equação (28) corresponde a restrição para o sistema de geração de energia termelétrica utilizado no item 3.1.2.

3.1.5 CASO 5

A Figura 3.5 mostra minirrede do caso 5, que é formada pela Concessionária, pelo Sistema de Geração de Energia Termelétrica, pelo Sistema de Armazenamento, Sistema de Geração de Energia Eólica, e pelo Sistema de Geração de Energia Solar.



A função objetivo da minirrede do caso 5 é dada pela equação (33).

$$FO_5 = \sum_{t=1}^T \lambda_R(t) \cdot P_R(t) + C(P_G(t)) + \sum_{t=1}^T \lambda_E(t) \cdot P_E(t) + \sum_{t=1}^T \lambda_S(t) \cdot P_S(t) \quad (33)$$

As contribuições referentes a energia eólica e a energia solar não serão consideradas na função objetivo, equação (33), devido ao comportamento de mercado destas fontes, conforme citado nos casos 3 e 4. Logo a função objetivo para este caso será a mesma dada pela equação (26).

As restrições da minirrede do caso 5 são dadas respectivamente pelas equações (20), (21), (22), (23), (28) e (34).

O balanço de potência, equação (34), foi obtido através do cálculo do fluxo de potência na minirrede da Figura 3.5.

$$P_R(t) + P_B(t) + P_G(t) + P_S(t) + P_E(t) = P_C \quad (34)$$

As restrições dadas pelas equações (20), (21), (22), (23), são as restrições do sistema de armazenamento, que foi o mesmo utilizado no item 3.1.1.

A restrição da equação (28) corresponde a restrição para o sistema de geração de energia termelétrica utilizado no item 3.1.2.

4 MATERIAL E MÉTODO

4 MATERIAL E MÉTODO

Neste capítulo pretende-se apresentar como o despacho econômico de minirredes com várias fontes de energia foi modelado e como os dados das simulações foram obtidos. Para a realização desse trabalho foram feitas pesquisas em livros, teses, dissertações e artigos. Foram pesquisados como o setor elétrico funciona e suas transformações ao longo do tempo, destacando neste panorama o despacho de energia elétrica. Após estudar e compreender as principais mudanças e o significado econômico que estas representam, iniciou-se o estudo do problema de despacho econômico, de modo a compreender melhor sua teoria e formulações aplicadas às minirredes com várias fontes de energia. Para tanto foram propostos vários cenários possíveis de configuração de minirredes para o fornecimento de energia para um consumidor industrial hipotético. Esse consumidor possui uma demanda de carga de 600kW. No trabalho, foram construídos cenários utilizando a rede da concessionária combinada com fontes de energia fotovoltaica, eólica, sistema de geração diesel e sistema de armazenamento de energia. Conforme visto no capítulo 3, também foi simulado um cenário englobando todas as fontes operando simultaneamente com a rede da concessionária.

Na implementação dos casos de otimização estudados, empregou-se o GAMS, um software computacional poderoso e consolidado com capacidade para a determinação de soluções para problemas de otimização com muitas variáveis e restrições, tanto lineares como não lineares [40].

4.1 GAMS

O GAMS foi desenvolvido por *Meeraus e Brooke* para o Banco Mundial em 1980 [45]. Ele possui uma linguagem de alto nível para a formulação de modelos de otimização, sendo hoje uma das ferramentas, para este campo, mais difundida em todo mundo, suportando um grande número de algoritmos. O GAMS permite especificar a estrutura de um modelo de otimização e calcular dados que fazem parte dele, resolvê-lo e fazer um relatório escrito sobre um modelo. A estruturação de problemas de otimização no GAMS possui os seguintes itens:

- SETS – definição de conjuntos; índices, e elementos de vetores.

- PARAMETERS – são as constantes do problema.
- VARIABLES – fatores a serem otimizados.
- EQUATIONS – módulo onde são expressas as restrições do problema e a função objetivo.
- MODEL – é usado para reunir equações em grupos e rotulá-los de modo que possam ser resolvidos.
- SOLVE – dá início ao processo de otimização. É nesse comando que se define o tipo de algoritmo a ser usado, se ocorrerá maximização ou minimização, e o qual é a função a ser otimizada (função-objetivo).

O GAMS facilita e agiliza a elaboração e manipulação de modelos de otimização, pois eles podem ser escritos e alterados sem complicações. O programador pode utilizar diversos algoritmos para a solução de um mesmo modelo. Os dados podem ser alterados e visualizados em arquivos de texto ou planilhas eletrônicas. Isto porque os seguintes princípios são usados para projetar um sistema no GAMS:

- Todos os métodos algorítmicos existentes ficam disponíveis, sem mudar a representação do modelo feita pelo usuário. A introdução de novos métodos, ou de novas implementações dos métodos existentes, deve ser possível sem exigir mudanças nos modelos existentes.
- O problema de otimização pode ser expresso independentemente dos dados que o mesmo utiliza. Essa separação entre lógica e dados permite que os problemas possam crescer em tamanho, sem causar um aumento na complexidade de representação.
- O uso do modelo de dados relacional requer que a alocação dos recursos computacionais seja automatizada. Isso significa que modelos grandes e complexos podem ser construídos sem que o usuário tenha que se preocupar com detalhes como os tamanhos das matrizes, vetores, etc.

O GAMS permite a otimização através de diversos “solvers”, como, por exemplo, MINOS, ZOOM, DICOPT e CONOPT3, além de utilizar uma linguagem de alto nível para a representação compacta de modelos grandes e complexos, possibilitando que descrições do modelo sejam independentes dos algoritmos de solução, e que alterações sejam feitas nas especificações do modelo de maneira

bastante simples. O projeto do GAMS utilizou-se da programação matemática, na maneira de descrever o problema e na infinidade de métodos de resolvê-lo, aliando-se a isso uma estrutura de trabalho para o desenvolvimento da organização geral e transformação de dados, incorporada da teoria dos bancos de dados relacionais. Na elaboração dos scripts no GAMS, utilizou-se NLP, e empregou-se o *solver* CONOPT, desenvolvido e mantido por *ARKI Consulting & Development* [46].

O CONOPT é um *solver* baseado no método do GRG apresentado no item 2.5.2. O método GRG exprime confiabilidade e velocidade para resolução de modelos com largo grau de não linearidade. A sua extensão abrange, além dos aspectos citados, a dificuldade para se obter o ponto ótimo procurado, devido ao número de iterações necessárias. As variáveis do problema são divididas em variáveis independentes ou de controle e variáveis dependentes ou de estado. As restrições funcionais e as restrições de canalização sobre as variáveis de estado são incluídas na função objetivo através de penalizações quadráticas externas.

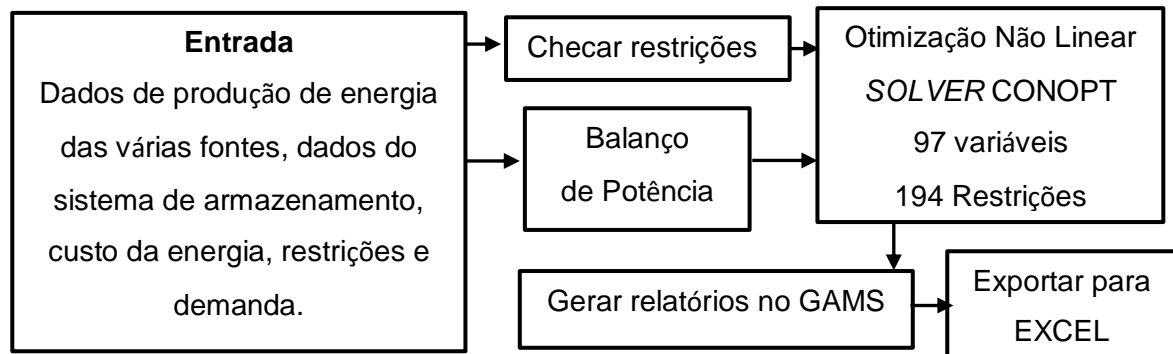
4.2 ALGORITMO PROPOSTO

A implementação do algoritmo proposto foi resolvida com o *solver* CONOPT. Foram realizadas várias simulações utilizando um consumidor industrial hipotético, no qual os dados foram manipulados de maneira a verificar as funcionalidades do modelo, obtendo-se resultados que mostram a importância do mesmo como ferramenta para analisar o impacto que cada parâmetro tem sobre as possíveis decisões a serem tomadas. O modelo apresentado considera ainda recursos de resposta da demanda e unidades de armazenamento de energia. O algoritmo em GAMS, mostrou-se muito eficiente pela rapidez e resultados obtidos.

O algoritmo proposto está apresentado na

Figura 4.1, inicialmente os dados de entrada são inseridos: coeficientes da função objetivo, restrições, custos e demanda. Após a inserção dos dados são calculados os limites e restrições. Com esses dados são calculados os custos de geração por minirrede, mediante minimização da função objetivo. Por fim são gerados os relatórios no GAMS e no Excel automaticamente.

Figura 4.1 - Algoritmo proposto



Fonte: Autor

4.3 DADOS DAS SIMULAÇÕES

Devido à dificuldade de levantar dados, pelo tema ser novo e pelas diferenças conceituais existentes, citadas no capítulo 2, foi utilizada a técnica paramétrica, que estima dados por comparação com problemas, regiões e comportamentos similares. Esta ação foi realizada, porque o estudo e o projeto detalhado dos componentes da minirrede, que compreende inclusive levantamento e medições em campo, inviabilizaria a modelagem e a simulação da minirrede por falta de recursos. A aplicação da técnica paramétrica é muito utilizada na fase inicial de grandes projetos, para realizar o estudo inicial de viabilidade econômica e técnica [47].

Os dados utilizados foram organizados para permitir a simulação de dois cenários:

- Cenário A: Minirrede composta de fontes de energia elétrica com produção suficiente para reduzir o consumo de energia elétrica da Concessionária.
- Cenário B: Minirrede composta por fontes de energia elétrica com capacidade de produção para injetar o excedente na rede da Concessionária.

Os preços considerados para a energia foram de R\$0,53 no horário fora de pico e R\$0,93 para o horário de pico. Conforme citado no capítulo 3, o custo da energia no mercado brasileiro é fixo, mudando apenas com relação ao horário (horário fora de pico ou horário de pico) e o tipo do consumidor. Esses valores foram baseados nos

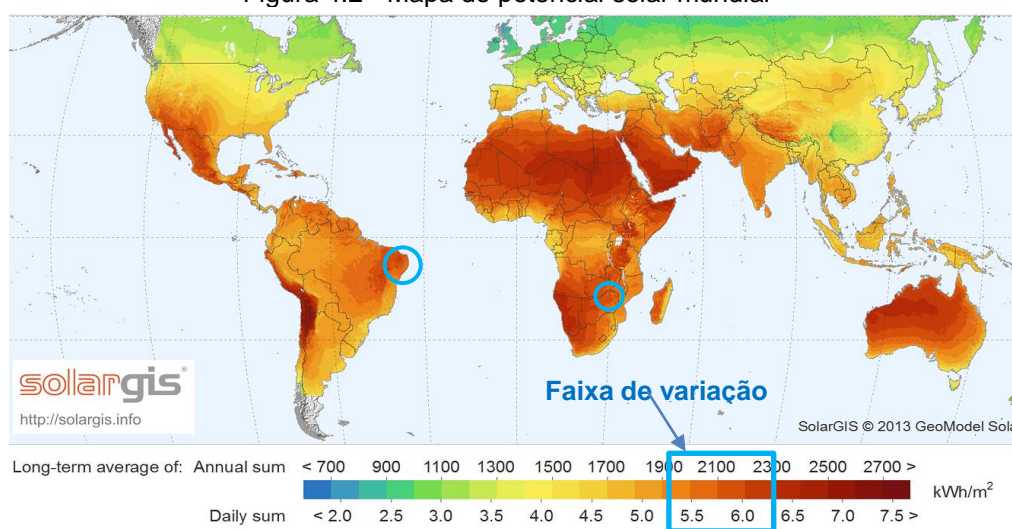
dados utilizados no simulador da CEMIG [48], que ofereceu dados mais completos se comparado a outros simuladores disponíveis para consulta dos usuários industriais.

4.3.1 Dados do Sistema de Energia Solar

4.3.1.1 Cenário A

Para obter o potencial de produção de energia solar para o cenário A, inicialmente foi consultado o Atlas Brasileiro de Energia Solar [49], que possui dados médios do potencial de produção de energia solar mensal variando de 72 a 172kWh⁸. Com esta informação foram estimados os dados de potência média de geração de energia solar por hora, para os quais foi utilizado o artigo [50], por apresentar dados do local de incidência solar similares aos do nordeste do Brasil, fato que pode ser observado destacado em azul na Figura 4.2. Esta comparação foi realizada para possibilitar a simulação de um dia, pois o Atlas Brasileiro de Energia Solar informa valores médios globais, ou seja não informa valores por hora para viabilizar o estudo do comportamento de um dia. Os dados de produção de energia solar para o cenário A estão apresentados na Tabela 4.1.

Figura 4.2 - Mapa do potencial solar mundial



Fonte: Adaptado de [51]

⁸ Atlas Brasileiro de Energia Solar, 2017, páginas 60 e 61, figuras 52 e 53. A taxa de desempenho admitida foi de 80% para geradores fotovoltaicos fixos e incerteza de 8,2%.

Tabela 4.1 - Dados de produção de energia solar para o Cenário A

t (h)	Solar (kW)	t (h)	Solar (kW)
1	0	13	14,78
2	0	14	15,59
3	0	15	13,56
4	0	16	11,83
5	0	17	10,17
6	0	18	7,66
7	0	19	0
8	7,99	20	0
9	10,56	21	0
10	13,61	22	0
11	14,97	23	0
12	15,00	24	0

Fonte: Adaptado de [50]

4.3.1.2 Cenário B

Para realizar a simulação da injeção de energia solar na rede da Concessionária, cenário B, os dados do artigo [50] foram multiplicados por 41, ou seja, para obter créditos de geração o sistema simulado no cenário A precisa ser 41 vezes maior. Os dados de produção de energia solar para o cenário B estão apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Dados de produção de energia solar Cenário B

t (h)	Solar (kW)	t (h)	Solar (kW)
1	0	13	605,98
2	0	14	639,19
3	0	15	555,96
4	0	16	485,03
5	0	17	416,97
6	0	18	314,06
7	0	19	0
8	327,59	20	0
9	432,96	21	0
10	558,01	22	0
11	613,77	23	0
12	615,00	24	0

Fonte: Adaptado de [50]

4.3.2 Dados do Sistema de Energia Eólica

4.3.2.1 Cenário A

Para simular a redução do consumo de energia da rede devido do cenário A, foram utilizados os dados do artigo [50], por apresentar dados locais similares aos do nordeste do Brasil. Esta comparação foi realizada para possibilitar a simulação de um dia para uma miniturbina, porque os dados do Atlas Eólico Brasileiro foram elaborados para sistemas eólicos de grande porte, em torno dos 50 m, enquanto miniturbinas geralmente possuem entre 10 e 40 metros. O vento varia conforme a altura. Os dados de produção de energia solar para o cenário A estão apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Dados de produção de energia Eólica Cenário A

t (h)	Eólica (kW)	t (h)	Eólica (kW)
1	7,56	13	10,42
2	7,50	14	10,15
3	8,25	15	9,67
4	8,48	16	8,98
5	8,48	17	8,37
6	9,42	18	7,61
7	9,82	19	6,70
8	10,35	20	5,72
9	10,88	21	7,21
10	11,01	22	7,75
11	10,94	23	7,88
12	10,68	24	7,69

Fonte: Adaptado de [50]

4.3.2.2 Cenário B

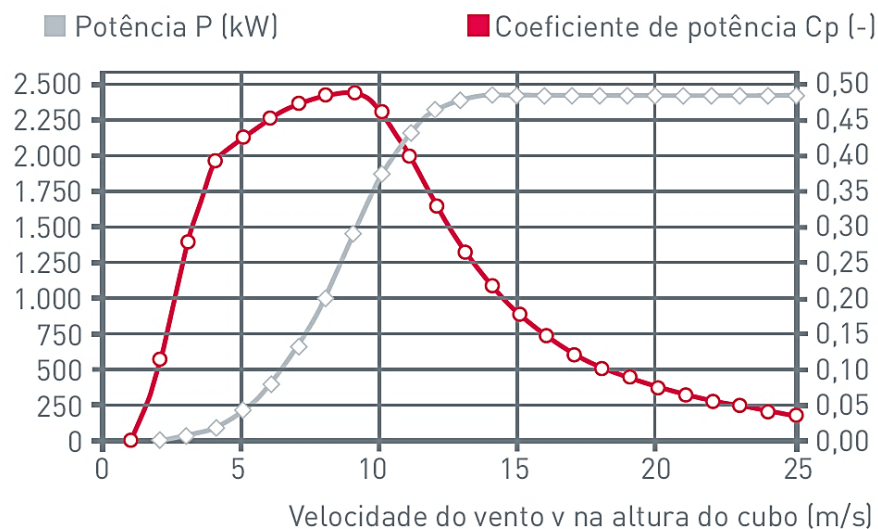
Para obtenção dos dados do sistema eólico para o cenário B, foi realizado inicialmente o levantamento do potencial eólico, cujo principal parâmetro estatístico é a velocidade média do vento. Para tanto foram verificados os dados de previsão de ventos de 2017, que variaram entre 3 e 8m/s. Os dados foram obtidos na plataforma do site *Windfinder* em conjunto com o Atlas Eólico Brasileiro. Com estes dados, foi consultado o manual do fabricante *Enercon*, e selecionada a turbina modelo *E-92*, Gráfico 4.1 e Tabela 4.4, para aproveitamento do potencial máximo e suprimento da

demanda com folga, para realizar a simulação da injeção da produção de energia excedente para a Concessionária.

Para facilitar a simulação foi selecionada a configuração com apenas uma turbina, entretanto poderia ter sido estimado um conjunto de turbinas, para atender a demanda ou reduzir o consumo da rede. O fabricante Enercon foi escolhido, por produzir turbinas eólicas no Brasil, possibilitando uma manutenibilidade mais fácil e rápida.

Os dados de produção de energia eólica do cenário B estão apresentados na Tabela 4.5.

Gráfico 4.1 - Curva de potência calculada, turbina E92



Fonte:[52]

Tabela 4.4 - Dados da turbina E92 adaptada do Manual Enercon

Vento (m/s)	Potência (kW)	Observação
1	0,0	
2	3,6	
3	29,9	
4	98,2	
5	208,3	
6	384,3	
7	637,0	a partir deste valor é possível obter excedentes
8	975,8	Velocidade máxima encontrada
9	1403,6	
10	1817,8	

Fonte:[52]

Tabela 4.5 - Dados de produção de energia Eólica Cenário B

t (h)	Eólica (kW)	t (h)	Eólica (kW)
1	21,8	13	321
2	24,5	14	319,8
3	25	15	318,5
4	80,3	16	306
5	81,5	17	321
6	81,8	18	532
7	81,5	19	815
8	100	20	780
9	154	21	532
10	174	22	501
11	281	23	200
12	320	24	82

Fonte: Adaptado de [52]

4.3.3 Dados do Sistema de Armazenamento

4.3.3.1 Cenário A

Os dados para o sistema de armazenamento foram obtidos do artigo [50]. Esta ação foi realizada, porque o estudo e o projeto detalhado dos componentes da minirrede inviabilizaria a modelagem e a simulação da minirrede por falta de recursos; porque para obter os dados do sistema de armazenamento seria necessário realizar os seguintes estudos [25] : Diferença de comportamento entre a carga e descarga; Efeito de sobrecarga e subcarga; Efeito de relaxamento; Histerese; Efeito de altas frequências; e Efeito da temperatura.

Os dados do Sistema de Armazenamento do cenário A estão apresentados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Dados do Sistema de Armazenamento

Descrição	Cenário A
SOC_{max}	300
SOC_{min}	40
SOC_0	40
PB_{max}	65
PB_{min}	-20

Fonte: Adaptado de [50]

4.3.3.2 Cenário B

Os dados para o sistema de armazenamento foram obtidos do artigo [50], os quais foram aumentados em 10 vezes, para realizar a simulação da injeção de energia excedente para a Concessionária. Por questão de segurança operacional a carga que a bateria utiliza da rede para carregar foi limitada em 100kW. Os dados do Sistema de Armazenamento do cenário B estão apresentados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 - Dados do Sistema de Armazenamento

Descrição	Cenário B
SOC_{max}	3000
SOC_{min}	400
SOC_0	400
PB_{max}	650
PB_{min}	-100

Fonte: Adaptado de [50]

4.3.4 Dados do Sistema de Energia Termelétrica

Com relação ao Sistema de Sistema de Energia Termelétrica, para obter os coeficientes da equação (24), seria necessário executar uma série de testes em estado permanente no gerador para vários níveis de entrada de combustível e coletar os dados de potência da saída para obter a curva de entrada/saída. A curva de custo, $P(\text{MW}) \times F(\text{u.m./h})$, seria traçada convertendo-se a curva de calor/potência ou entrada/saída da unidade geradora, $P(\text{MW}) \times H(\text{MBtu/h})$ para a curva de calor/potência com ordenada em MBtu/hora, e multiplicando-a pelo custo da quantidade de combustível necessária para cada 1MBtu de calor gerado. Por simplificação os coeficientes a_i, b_i e c_i da equação (24) foram obtidos de [25], resultando na equação (35), utilizada nas simulações para todos os casos e cenários.

$$0,002P_G^2(t) + 0,3P_G(t) + 10 \quad (35)$$

Os limites de geração são: $P_{G_{\max}} = 200 \text{ kW}$ e $P_{G_{\min}} = 0 \text{ kW}$

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo pretende-se aplicar a modelagem do despacho econômico de energia elétrica em minirredes apresentada no capítulo 3 para cinco casos. Os dados utilizados nas simulações constam no capítulo 4, e estão divididos em dois cenários A e B. As simulações foram realizadas na versão 23.5.1 WIN 18471.18495 VS8 x86/MS do GAMS, cujos resultados estão listados nas Tabelas de 5.1 a 5.11 e nos Gráficos 5.1 a 5.11.

5.1 SIMULAÇÕES DO CASO BASE

O caso base apresenta os dados de custo da energia fornecida pela Concessionária. Este foi elaborado para possibilitar a comparação com as configurações de minirredes propostas. Os dados estão mostrados na Tabela 5.1, estes foram calculados tendo como base a demanda de 600kW, considerando apenas a Concessionária como fornecedora de energia para o Consumidor.

Nessa condição, o custo do suprimento é de R\$ 8.352, sendo este valor a referência para as análises das seções de 5.2 a 5.7.

Tabela 5.1 - Caso base: Resultados da Concessionária

Descrição	Tempo (h)	Demanda (kWh)	Custo (R\$)
Horário de ponta	3	$600 \times 3 = 1.800$	$1.800 \times 0,93 = 1.674$
Horário fora de ponta	21	$600 \times 21 = 12.600$	$600 \times 0,53 = 6.678$
Custo Total (R\$)			8.352

5.2 SIMULAÇÕES DO CASO 1

5.2.1 Cenário A

As simulações da minirrede do caso 1, Figura 3.1, foram realizadas considerando o Sistema de Armazenamento reduzindo a demanda consumida da rede. Os resultados obtidos estão apresentados no Gráfico 5.1 e na Tabela 5.2.

Analizando os resultados pode ser verificado que as baterias do Sistema de Armazenamento carregam utilizando a energia da Concessionária até as 17 horas. Apartir das 18 horas as baterias passam a fornecer uma parcela de 65 kW energia para o consumidor, reduzindo o consumo da Rede. A redução do consumo da Rede é em torno de 11% no horário de pico, entretando às 20 horas as baterias voltam a recarregar, reiniciando a redução de consumo da rede das 23 horas até as 00 horas. O custo para este caso foi de R\$ 8.274,00. A variação do SOC permite perceber o carregamento das baterias. A entrada da bateria em operação depois das 23 horas, pode ser inibida com um controlador de carga, entrentando não foi inserido o critério de corte nesse caso, para visualização do efeito da falta de controle.

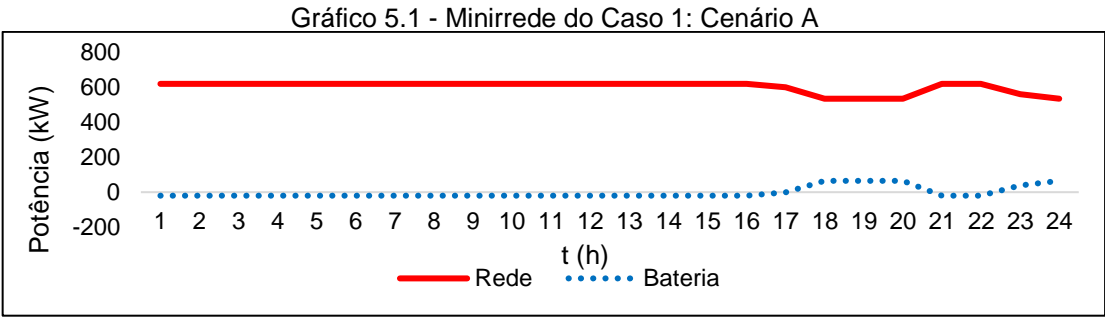


Tabela 5.2 - Minirrede do Caso 1: Cenário A

t (h)	Rede (kW)	Bateria (kW)	SOC (kW)
1	620	-20	80
2	620	-20	80
3	620	-20	80
4	620	-20	80
5	620	-20	80
6	620	-20	100
7	620	-20	120
8	620	-20	140
9	620	-20	160
10	620	-20	180
11	620	-20	200
12	620	-20	220
13	620	-20	240
14	620	-20	260
15	620	-20	280
16	620	-20	300
17	600	0	300
18	535	65	235
19	535	65	170
20	535	65	105
21	620	-20	125
22	620	-20	145
23	560	40	105
24	535	65	40

5.2.2 Cenário B

As simulações da minirrede do caso 1, Figura 3.1, foram realizadas considerando a minirrede injetando energia na Rede. Os resultados obtidos estão mostrados no Gráfico 5.2 e na Tabela 5.3.

Gráfico 5.2 - Minirrede do Caso 1: Cenário B



Tabela 5.3 - Minirrede do Caso 1: Cenário B

t (h)	Rede (kW)	Bateria (kW)	SOC (kW)
1	700	-100	500
2	700	-100	600
3	700	-100	700
4	700	-100	800
5	700	-100	900
6	700	-100	1000
7	700	-100	1100
8	700	-100	1200
9	700	-100	1300
10	700	-100	1400
11	700	-100	1500
12	700	-100	1600
13	700	-100	1700
14	700	-100	1800
15	700	-100	1900
16	700	-100	2000
17	700	-100	2100
18	0	600	1500
19	0	600	900
20	0	600	400
21	400	200	500
22	700	-100	600
23	700	-100	700
24	700	-100	800

Avaliando os resultados verifica-se que as baterias do Sistema de Armazenamento carregam até as 17 horas, neste período o valor de $P_B = -100$ e $P_R = 700$, indicando processo de carregamento das baterias. No período das 18 horas até as 20 horas o Sistema de Armazenamento injeta energia na Rede da Concessionária. A variação do SOC permite perceber o carregamento e o descarregamento das baterias. O custo para este caso foi de R\$ 7.672,00.

5.3 SIMULAÇÕES DO CASO 2

5.3.1 Cenário A

Para a minirrede do caso 2, Figura 3.2, primeiramente foi testada a conexão do Sistema de Energia Termelétrica do item 4.3.4 com a Concessionária, a fim de verificar o custo, cujo valor obtido foi R\$ 8.604,3, ou seja, um valor acima do custo do Caso Base e demais configurações de minirredes apresentados nos Casos de 1 a 5. Por esse motivo não foi proposta uma minirrede com a Concessionária e os geradores térmicos.

Contudo, uma alternativa possível é a um sistema de geração de energia backup para manter as baterias do sistema de armazenamento em níveis viáveis. Por isso foi inserido um gerador diesel na microrrede, que será acionado quando o estado de carga do banco de baterias está baixo ou em situações de emergência quando a potência demandada pelas cargas é muito elevada. Por isso o gerador do Sistema de Energia Termelétrica não possui capacidade para abastecer a carga de forma independente.

Outro fator importante a ser citado é que a utilização de um sistema de geração diesel menor, permite a redução do consumo de combustível e, consequentemente, dos custos operacionais do sistema e das emissões.

Os resultados das simulações realizadas com objetivo de testar a influência do gerador na minirrede do caso 2 no cenário A estão apresentados no Gráfico 5.3 e na Tabela 5.4.

Nos resultados verifica-se que as baterias do Sistema de Armazenamento carregam até as 17 horas, neste período o valor de P_B varia entre -17kW e -20kW

indicando processo de carregamento das baterias, que neste caso recebe contribuição do gerador. No período das 18 horas até as 20 horas a contribuição da minirrede reduz o valor de P_R no horário de pico. A variação do SOC também permite perceber o carregamento das baterias. O custo para este caso foi de R\$ 8.226,3.

Gráfico 5.3 - Minirrede do Caso 2: Cenário A

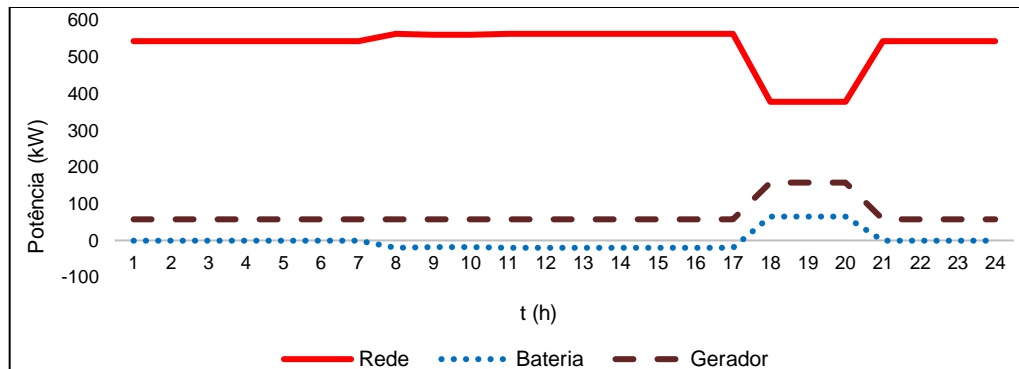


Tabela 5.4 - Minirrede do Caso 2: Cenário A

t (h)	Rede (kW)	Bateria (kW)	SOC (kW)	Gerador (kW)
1	542,5	0	40	57,5
2	542,5	0	40	57,5
3	542,5	0	40	57,5
4	542,5	0	40	57,5
5	542,5	0	40	57,5
6	542,5	0	40	57,5
7	542,5	0	40	57,5
8	562,5	-20	60	57,5
9	560	-17,5	77,5	57,5
10	560	-17,5	95	57,5
11	562,5	-20	115	57,5
12	562,5	-20	135	57,5
13	562,5	-20	155	57,5
14	562,5	-20	175	57,5
15	562,5	-20	195	57,5
16	562,5	-20	215	57,5
17	562,5	-20	235	57,5
18	377,5	65	170	157,5
19	377,5	65	105	157,5
20	377,5	65	40	157,5
21	542,5	0	40	57,5
22	542,5	0	40	57,5
23	542,5	0	40	57,5
24	542,5	0	40	57,5

5.3.2 Cenário B

As simulações para minirrede do caso 2, Figura 3.2, foram realizadas considerando a injeção de energia na Rede. Os resultados obtidos estão mostrados no Gráfico 5.5 e na Tabela 5.5.

Gráfico 5.4 - Minirrede do Caso 2: Cenário A

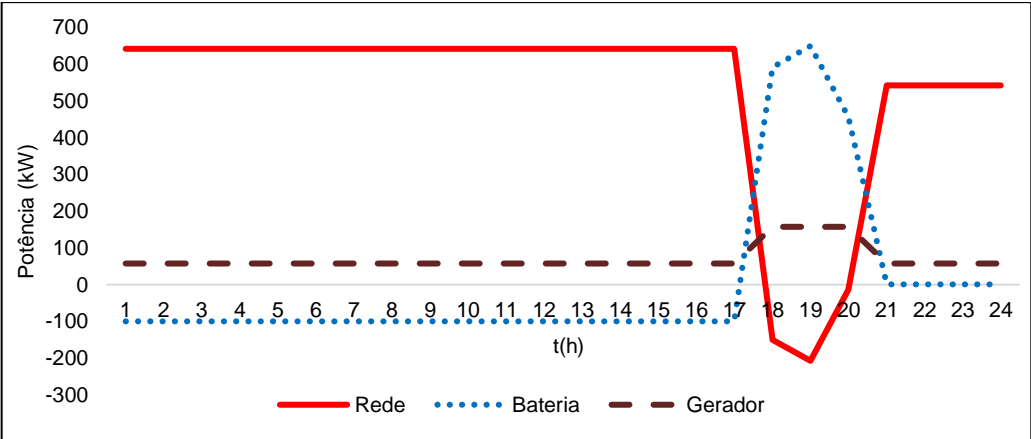


Tabela 5.5 - Minirrede do Caso 2: Cenário B

t (h)	Rede (kW)	Bateria (kW)	SOC (kW)	Gerador (kW)
1	642,5	-100	500	57,5
2	642,5	-100	600	57,5
3	642,5	-100	700	57,5
4	642,5	-100	800	57,5
5	642,5	-100	900	57,5
6	642,5	-100	1000	57,5
7	642,5	-100	1100	57,5
8	642,5	-100	1200	57,5
9	642,5	-100	1300	57,5
10	642,5	-100	1400	57,5
11	642,5	-100	1500	57,5
12	642,5	-100	1600	57,5
13	642,5	-100	1700	57,5
14	642,5	-100	1800	57,5
15	642,5	-100	1900	57,5
16	642,5	-100	2000	57,5
17	642,5	-100	2100	57,5
18	-150,457	592,957	1507,043	157,5
19	-207,5	650	857,043	157,5
20	-14,543	457,043	400	157,5
21	542,5	0	400	57,5
22	542,5	0	400	57,5
23	542,5	0	400	57,5
24	542,5	0	400	57,5

Avaliando os resultados verifica-se que as baterias do Sistema de Armazenamento carregam até as 17 horas, neste período o valor de $P_B = -100$ indicando processo de carregamento das baterias, que nesse caso recebe contribuição do gerador. A variação do SOC também permite perceber o carregamento e descarregamento das baterias. A inserção do gerador na minirrede provocou a redução de $P_R = 700$ (no item 5.2.2 sem gerador) para $P_R = 642,5$. No período das 18 horas até as 20 horas a minirrede injeta energia na Rede da Concessionária. O custo para este caso foi de R\$ 7.672,00.

5.4 SIMULAÇÕES DO CASO 3

5.4.1 Cenário A

As simulações da minirrede do caso 3, Figura 3.3, foram realizadas considerando a minirrede reduzindo a demanda consumida da rede. Os resultados obtidos estão apresentados no Gráfico 5.5 e na Tabela 5.6.

Gráfico 5.5 - Minirrede do Caso 3: Cenário A

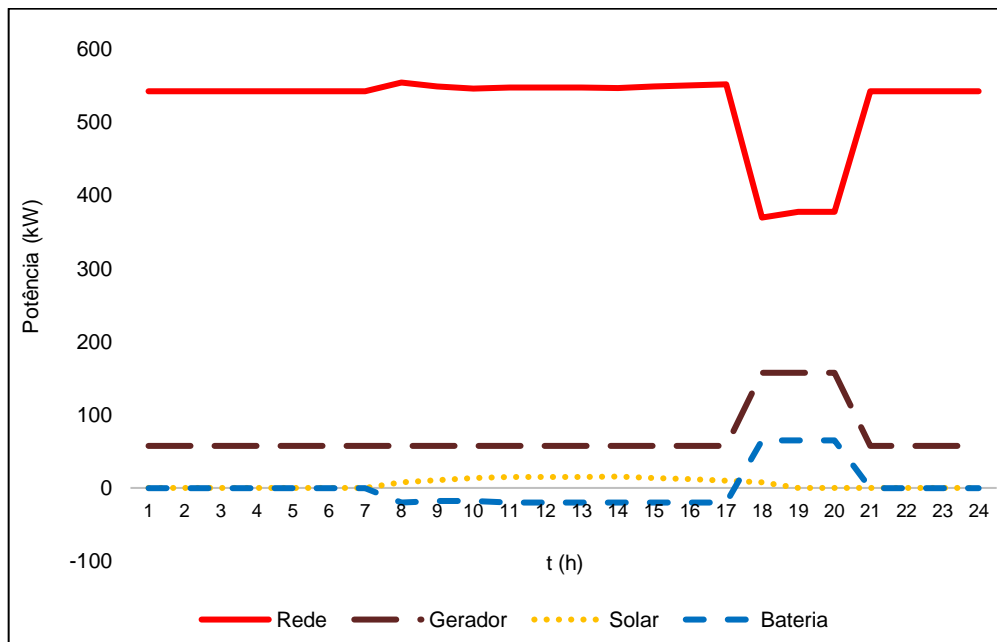


Tabela 5.6 - Minirrede do Caso 3: Cenário A

t (h)	Rede (kW)	Bateria (kW)	SOC (kW)	Gerador (kW)	Solar (kW)
1	542,5	0	40	57,5	0
2	542,5	0	40	57,5	0
3	542,5	0	40	57,5	0
4	542,5	0	40	57,5	0
5	542,5	0	40	57,5	0
6	542,5	0	40	57,5	0
7	542,5	0	40	57,5	0
8	554,5	-20	60	57,5	7,99
9	549,4	-17,5	77,5	57,5	10,56
10	546,4	-17,5	95	57,5	13,61
11	547,5	-20	115	57,5	14,97
12	547,5	-20	135	57,5	15
13	547,7	-20	155	57,5	14,78
14	546,9	-20	175	57,5	15,59
15	548,9	-20	195	57,5	13,56
16	550,7	-20	215	57,5	11,83
17	552,3	-20	235	57,5	10,17
18	369,8	65	170	157,5	7,66
19	377,5	65	105	157,5	0
20	377,5	65	40	157,5	0
21	542,5	0	40	57,5	0
22	542,5	0	40	57,5	0
23	542,5	0	40	57,5	0
24	542,5	0	40	57,5	0

Nos resultados pode ser verificado que as baterias do Sistema de Armazenamento carregam até as 17 horas, neste período o valor de P_B é negativo indicando processo de carregamento das baterias, que neste caso recebe contribuição do gerador e do sistema de geração de energia solar. No período das 18 horas até as 20 horas a contribuição da minirrede reduz o valor de P_R no horário de pico para valores em sua maioria abaixo que os do item 5.3.1. A variação do SOC também permite perceber o carregamento das baterias, que mostram o início do consumo de energia da minirrede com SOC = 235. O custo para este caso foi de R\$ 8.151,3.

5.4.2 Cenário B

As simulações para minirrede do caso 3, Figura 3.3, foram realizadas considerando a injeção de energia na Rede. Os resultados obtidos estão mostrados no Gráfico 5.6 e na Tabela 5.7.

Gráfico 5.6 - Minirrede do Caso 3: Cenário B

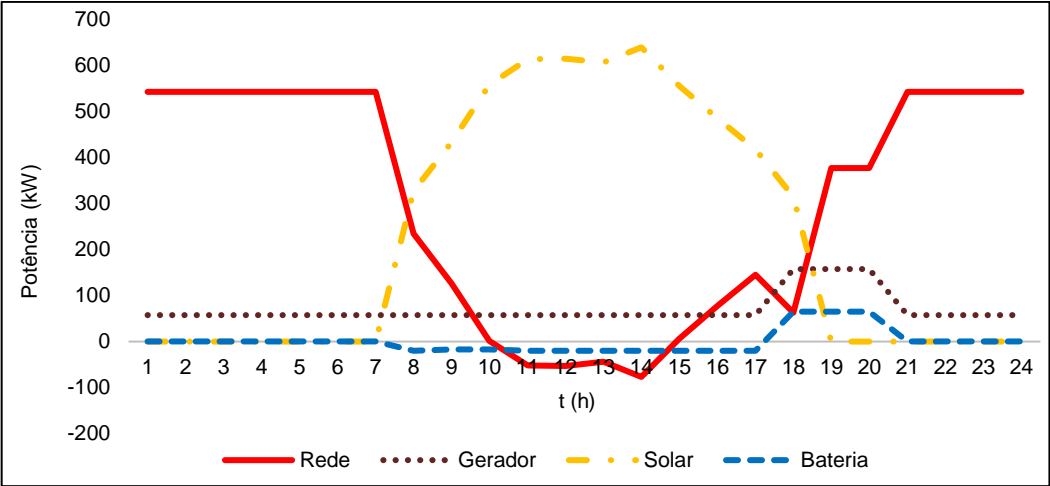


Tabela 5.7 - Minirrede do Caso 3: Cenário B

t (h)	Rede (kW)	Bateria (kW)	SOC (kW)	Gerador (kW)	Solar (kW)
1	542,5	0	40	57,5	0
2	542,5	0	40	57,5	0
3	542,5	0	40	57,5	0
4	542,5	0	60	57,5	0
5	542,5	0	77,5	57,5	0
6	542,5	0	95	57,5	0
7	542,5	0	115	57,5	0
8	234,9	-20	135	57,5	327,6
9	127	-17,5	155	57,5	433
10	1,99	-17,5	175	57,5	558
11	-51,3	-20	195	57,5	613,8
12	-52,5	-20	215	57,5	615
13	-43,5	-20	235	57,5	606
14	-76,7	-20	170	57,5	639,2
15	6,54	-20	105	57,5	556
16	77,47	-20	40	57,5	485
17	145,5	-20	40	57,5	417
18	63,44	65	40	157,5	314,1
19	377,5	65	40	157,5	0
20	377,5	65	40	157,5	0
21	542,5	0	40	57,5	0
22	542,5	0	40	57,5	0
23	542,5	0	40	57,5	0
24	542,5	0	40	57,5	0

Avaliando os resultados verifica-se que as baterias do Sistema de Armazenamento carregam até as 17 horas, neste período o valor de P_B é negativo indicando o processo de carregamento das baterias. A variação do SOC também permite perceber o carregamento e descarregamento das baterias. Vale salientar que o aumento na capacidade do sistema de energia solar não influenciou no acúmulo de

energia nas baterias por essas estarem operando em sua capacidade máxima, logo para aproveitar melhor o aproveitamento de energia solar no horário de pico é necessário aumentar a capacidade do Sistema de Armazenamento de energia. A inserção do Sistema de energia solar na minirrede provocou a redução de P_R . No período das 11 horas até as 14 horas a minirrede injeta energia na Rede da Concessionária. Esta injeção no período diurno ocorre devido a produção de energia solar ser neste período. O custo para este caso foi de R\$ 5.151,5.

5.5 SIMULAÇÕES DO CASO 4

5.5.1 Cenário A

As simulações da minirrede do caso 4, Figura 3.4, foram realizadas considerando a minirrede reduzindo a demanda consumida da rede. Os resultados obtidos estão apresentados no Gráfico 5.7 e na Tabela 5.8.

Gráfico 5.7 - Minirrede do Caso 4: Cenário A

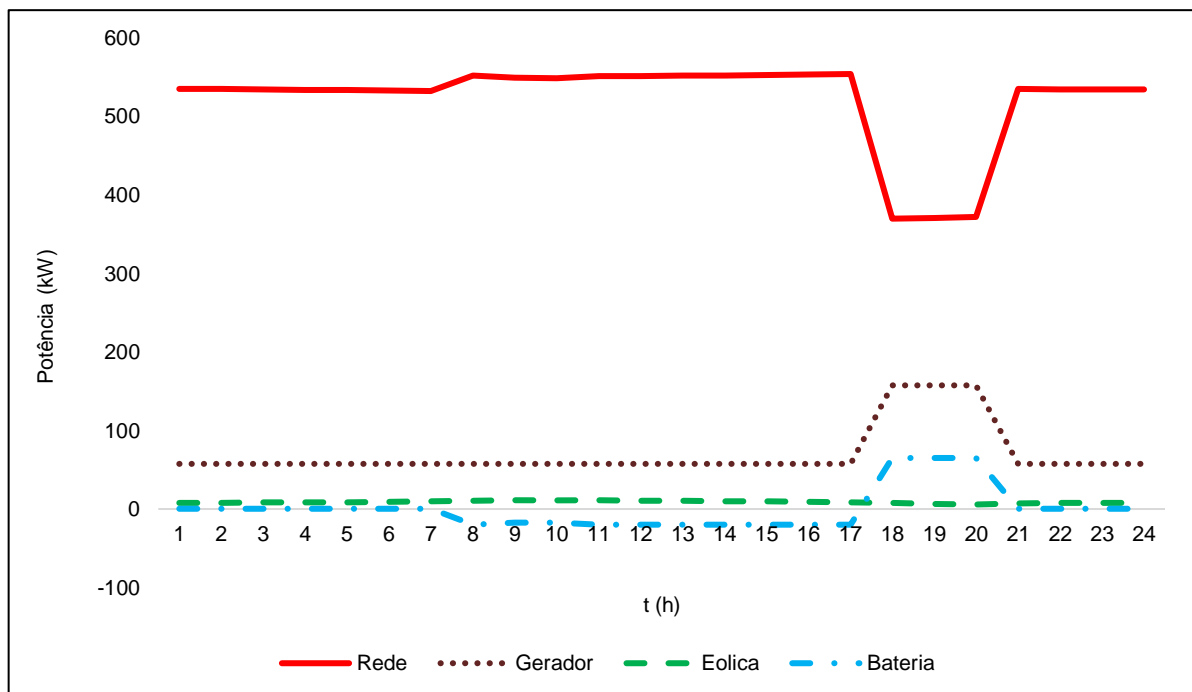


Tabela 5.8 - Minirrede do Caso 4: Cenário A

t (h)	Rede (kW)	Bateria (kW)	SOC (kW)	Gerador (kW)	Eólica (kW)
1	534,94	0	40	57,5	7,56
2	535	0	40	57,5	7,5
3	534,25	0	40	57,5	8,25
4	534,02	0	40	57,5	8,48
5	534,02	0	40	57,5	8,48
6	533,08	0	40	57,5	9,42
7	532,68	0	40	57,5	9,82
8	552,15	-20	60	57,5	10,35
9	549,12	-17,5	77,5	57,5	10,88
10	548,99	-17,5	95	57,5	11,01
11	551,56	-20	115	57,5	10,94
12	551,82	-20	135	57,5	10,68
13	552,08	-20	155	57,5	10,42
14	552,35	-20	175	57,5	10,15
15	552,83	-20	195	57,5	9,67
16	553,52	-20	215	57,5	8,98
17	554,13	-20	235	57,5	8,37
18	369,89	65	170	157,5	7,61
19	370,8	65	105	157,5	6,7
20	371,78	65	40	157,5	5,72
21	535,29	0	40	57,5	7,21
22	534,75	0	40	57,5	7,75
23	534,62	0	40	57,5	7,88
24	534,81	0	40	57,5	7,69

Analizando os resultados pode ser verificado que as baterias do Sistema de Armazenamento carregam até as 17 horas, neste período o valor de P_B é negativo indicando processo de carregamento das baterias, que neste caso recebe contribuição do gerador e do sistema de geração de energia eólica. A variação do SOC também permite perceber o carregamento e o descarregamento das baterias, que mostram o início do consumo de energia da minirrede com $SOC = 235$, próximo ao limite máximo. O valor do SOC reduz rapidamente em virtude do fornecimento. No período das 18 horas até as 20 horas a contribuição da minirrede reduz de forma mais evidente o valor de P_R no horário de pico. O custo para este caso foi de R\$ 8.106,2.

5.5.2 Cenário B

As simulações da minirrede do caso 4, Figura 3.4, foram realizadas considerando a minirrede injetando energia na rede. Os resultados obtidos estão apresentados no Gráfico 5.8 e na Tabela 5.9.

Gráfico 5.8 - Minirrede do Caso 4: Cenário B

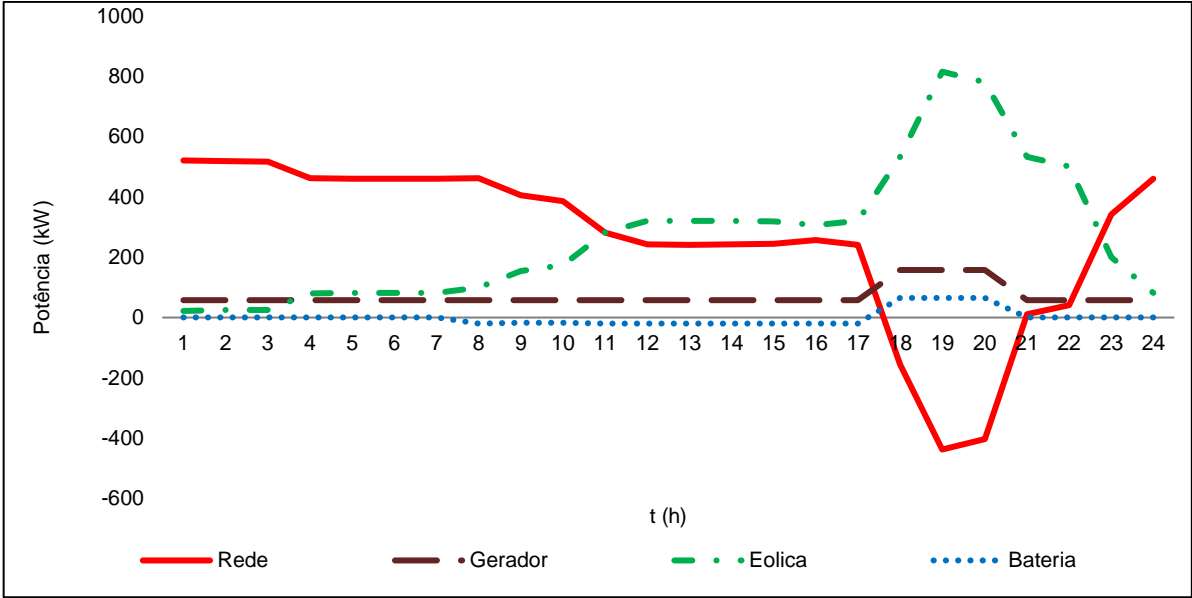


Tabela 5.9 - Minirrede do Caso 4: Cenário B

t (h)	Rede (kW)	Bateria (kW)	SOC (kW)	Gerador (kW)	Eólica (kW)
1	520,7	0	40	57,5	21,8
2	518	0	40	57,5	24,5
3	517,5	0	40	57,5	25,0
4	462,2	0	40	57,5	80,3
5	461	0	40	57,5	81,5
6	460,7	0	40	57,5	81,8
7	461	0	40	57,5	81,5
8	462,5	-20	60	57,5	100,0
9	406	-17,5	77,5	57,5	154,0
10	386	-17,5	95	57,5	174,0
11	281,5	-20	115	57,5	281,0
12	242,5	-20	135	57,5	320,0
13	241,5	-20	155	57,5	321,0
14	242,7	-20	175	57,5	319,8
15	244	-20	195	57,5	318,5
16	256,5	-20	215	57,5	306,0
17	241,5	-20	235	57,5	321,0
18	-154,5	65	170	157,5	532,0
19	-437,5	65	105	157,5	815,0
20	-402,5	65	40	157,5	780,0
21	10,5	0	40	57,5	532,0
22	41,5	0	40	57,5	501,0
23	342,5	0	40	57,5	200,0
24	460,5	0	40	57,5	82,0

Os resultados indicam que as baterias do Sistema de Armazenamento carregam até as 17 horas, neste período o valor de P_B é negativo indicando o processo de carregamento das baterias. A variação do SOC também permite perceber o

carregamento e descarregamento das baterias. Vale salientar que o aumento na capacidade do sistema de energia eólica não influenciou no acúmulo de energia nas baterias por essas estarem operando em sua capacidade máxima, logo para aproveitar melhor o aproveitamento de energia eólica é necessário aumentar a capacidade do Sistema de Armazenamento de energia. A inserção do Sistema de energia eólica na minirrede provocou a redução de P_R , inclusive maior que a redução obtida no cenário B para a energia solar. Isto se deve ao comportamento do recurso eólico, que produz energia em períodos onde o nível de radiação solar é baixo ou inexistente. Por esse motivo durante todo o dia ocorreu redução em P_R , sendo mais evidente no período das 18 horas até as 20 horas com a injeção de energia na Rede da Concessionária, obtendo com isso créditos. O custo para este caso foi de R\$ 3.955,00

5.6 SIMULAÇÕES DO CASO 5

5.6.1 Cenário A

As simulações da minirrede do caso 5, Figura 3.5, foram realizadas considerando a minirrede reduzindo a demanda consumida da rede. Os resultados obtidos estão apresentados nos Gráficos 5.9 e 5.10, e na Tabela 5.10.

Gráfico 5.9 - Minirrede do Caso 5: Cenário A

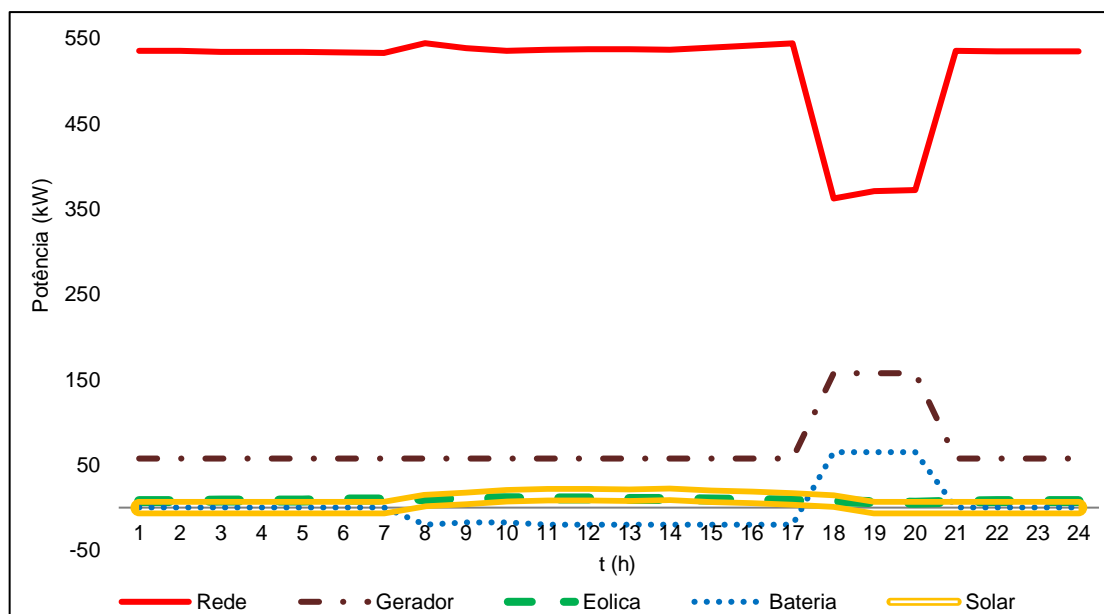


Gráfico 5.10 - Minirrede do Caso 5: Cenário A – Ampliação (eólica, solar e bateria)

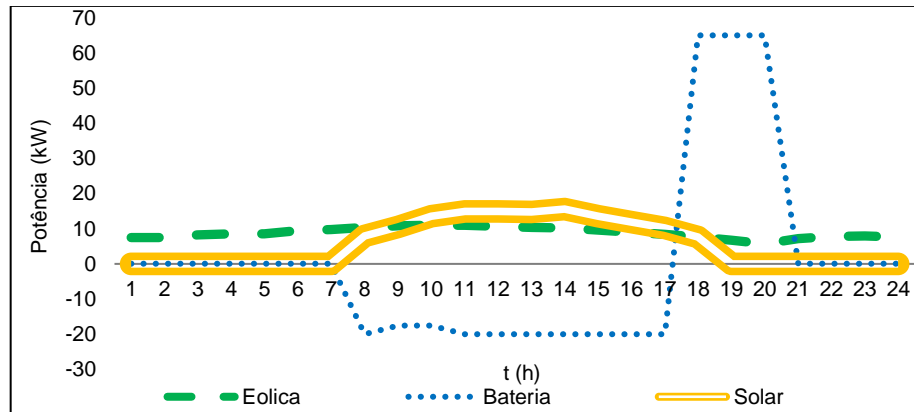


Tabela 5.10 - Minirrede do Caso 5: Cenário A

t (h)	Rede (kW)	Bateria (kW)	SOC (kW)	Gerador (kW)	Eólica (kW)	Solar (kW)
1	534,94	0	40	57,5	7,56	0
2	535	0	40	57,5	7,5	0
3	534,25	0	40	57,5	8,25	0
4	534,02	0	40	57,5	8,48	0
5	534,02	0	40	57,5	8,48	0
6	533,08	0	40	57,5	9,42	0
7	532,68	0	40	57,5	9,82	0
8	544,16	-20	60	57,5	10,35	7,99
9	538,56	-17,5	77,5	57,5	10,88	10,56
10	535,38	-17,5	95	57,5	11,01	13,61
11	536,59	-20	115	57,5	10,94	14,97
12	536,82	-20	135	57,5	10,68	15
13	537,3	-20	155	57,5	10,42	14,78
14	536,76	-20	175	57,5	10,15	15,59
15	539,27	-20	195	57,5	9,67	13,56
16	541,69	-20	215	57,5	8,98	11,83
17	543,96	-20	235	57,5	8,37	10,17
18	362,23	65	170	157,5	7,61	7,66
19	370,8	65	105	157,5	6,7	0
20	371,78	65	40	157,5	5,72	0
21	535,29	0	40	57,5	7,21	0
22	534,75	0	40	57,5	7,75	0
23	534,62	0	40	57,5	7,88	0
24	534,81	0	40	57,5	7,69	0

Avaliando os resultados pode ser verificado que as baterias do Sistema de Armazenamento carregam até as 17 horas, neste período o valor de P_B é negativo indicando processo de carregamento das baterias, que neste caso recebe contribuição do gerador e do sistema de geração de energia eólica. A variação do SOC também permite perceber o carregamento e o descarregamento das baterias, que mostram o início do consumo de energia da minirrede com SOC = 235. No

período das 18 horas até as 20 horas a contribuição da minirrede reduz o valor de P_R no horário de pico. O custo para este caso foi de R\$ 8.031,2.

5.6.2 Cenário B

As simulações da minirrede do caso 5, Figura 3.5, foram realizadas considerando a minirrede injetando energia na rede. Os resultados obtidos estão apresentados no Gráfico 5.11 e na Tabela 5.11.

Os resultados indicam que a injeção de energia na Rede da Concessionária ocorreu das 09 horas até as 20 horas e durante as outras horas do dia ocorreu redução do consumo de energia da Rede. A variação do SOC permite perceber o carregamento e descarregamento das baterias, valores de P_B negativos indicam o carregamento da bateria. A inserção de todas as fontes na minirrede provocou a redução de P_R , inclusive maior que a redução obtida em todos os casos e cenários simulados nos itens anteriores. Isto se deve ao dimensionamento e comportamento dos recursos eólico e solar. O custo para este caso foi de R\$ 880,2.

Gráfico 5.11 - Minirrede do Caso 5: Cenário B

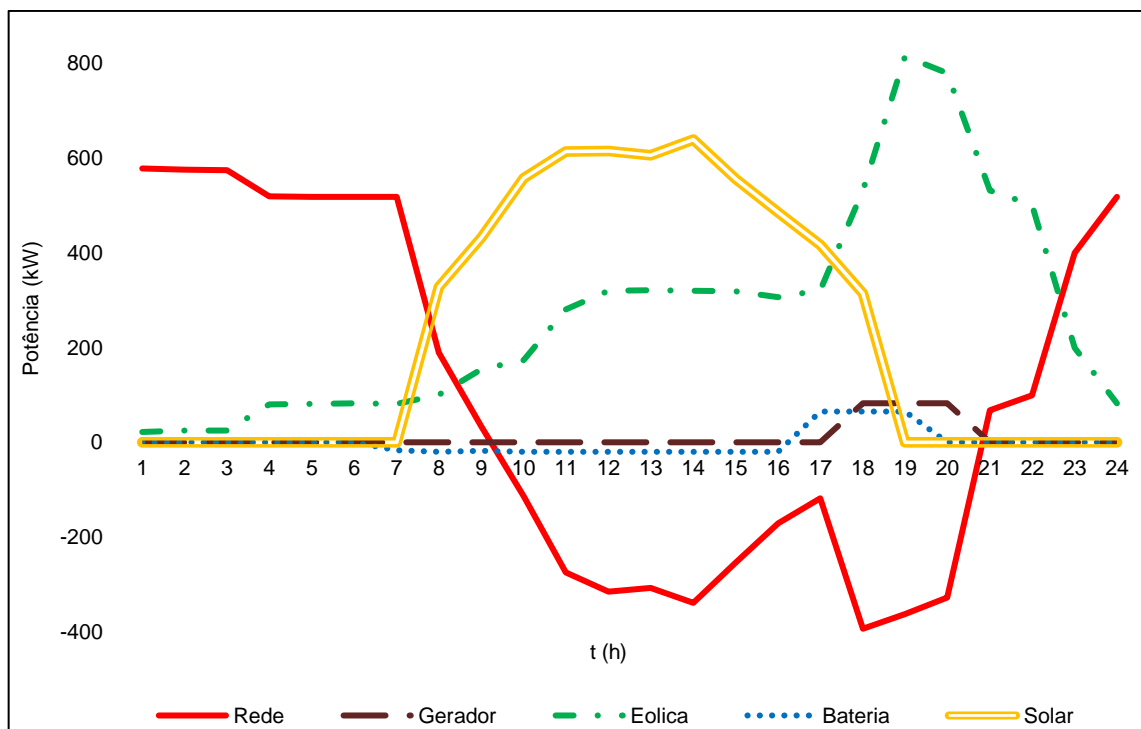


Tabela 5.11 - Minirrede do Caso 5: Cenário B

t (h)	Rede (kW)	SOC (kW)	Gerador (kW)	Eólica (kW)	Bateria (kW)	Solar (kW)
1	520,7	40	57,5	21,8	0	0
2	518	40	57,5	24,5	0	0
3	517,5	40	57,5	25	0	0
4	462,2	40	57,5	80,3	0	0
5	461	40	57,5	81,5	0	0
6	460,7	40	57,5	81,8	0	0
7	461	40	57,5	81,5	0	0
8	133,9	59	57,5	100	-19	327,6
9	-26,5	77	57,5	154	-18	433
10	-171,5	95	57,5	174	-18	558
11	-332,3	115	57,5	281	-20	613,8
12	-372,5	135	57,5	320	-20	615
13	-364,5	155	57,5	321	-20	606
14	-396,5	175	57,5	319,8	-20	639,2
15	-312	195	57,5	318,5	-20	556
16	-228,5	215	57,5	306	-20	485
17	-175,5	235	57,5	321	-20	417
18	-468,6	170	157,5	532	65	314,1
19	-437,5	105	157,5	815	65	0
20	-402,5	40	157,5	780	65	0
21	10,5	40	57,5	532	0	0
22	41,5	40	57,5	501	0	0
23	342,5	40	57,5	200	0	0
24	460,5	40	57,5	82	0	0

5.7 COMPARATIVO DAS MINIRREDES

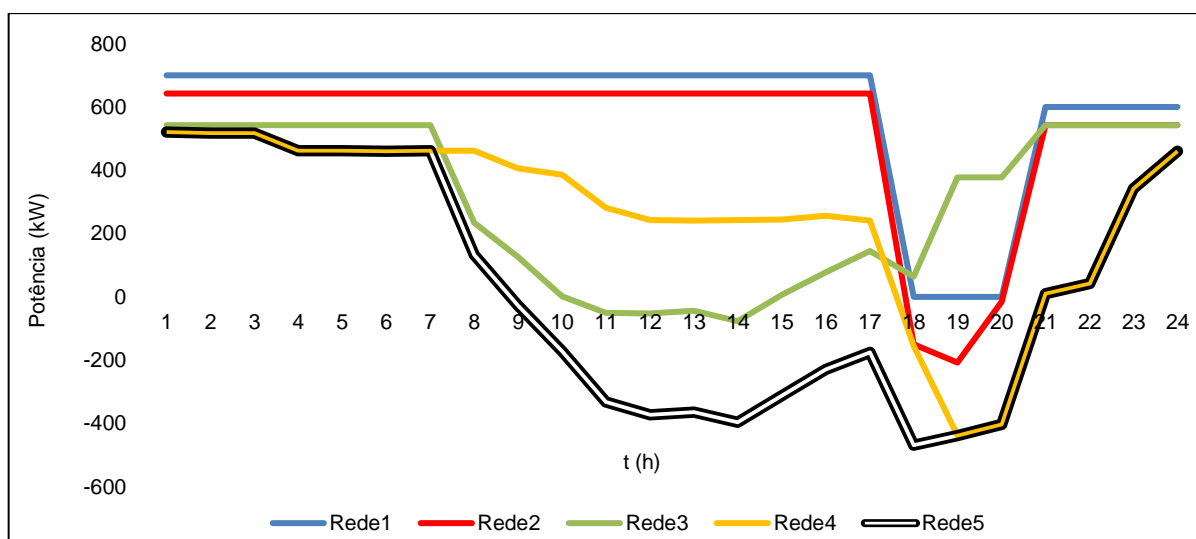
Na Tabela 5.12 está apresentada o comparativo das minirredes por Caso e Cenário. O menor custo verificado nas simulações foi obtido no caso 5 no cenário B; o maior custo foi obtido na simulação do caso base.

O Gráfico 5.12 foi plotado para verificar e comparar a resposta da Concessionária para cada configuração de minirrede no cenário B, ou seja nas minirredes cujos resultados obtidos indicaram excedentes na produção de energia, que pode ser injetado na rede e gerar créditos para o consumidor, diminuindo assim o faturamento final de energia, de acordo com a Resolução Normativa Nº 687 da ANEEL.

Tabela 5.12 - Comparativo das Minirredes por Caso e Cenário

Configuração	Situação	Custo (R\$)
CASO BASE	Fornecendo 100% da demanda	8.352
CASO 1	Cenário A	8.274
	Cenário B	7.672
CASO 2	Cenário A	8.226,3
	Cenário B	7.624
CASO 3	Cenário A	8.151,3
	Cenário B	5.151,5
CASO 4	Cenário A	8.106,2
	Cenário B	3.955
CASO 5	Cenário A	8.031,2
	Cenário B	880,2

Gráfico 5.12 - Comparativo da resposta da Concessionária para cada configuração de minirrede no cenário B.



OBSERVAÇÃO: A Rede 1 corresponde a minirrede do caso 1, A Rede 2 corresponde a minirrede do caso 2, A Rede 3 corresponde a minirrede do caso 3 e assim sucessivamente.

Analisando e comparando os resultados entre si, verifica-se em todos os casos estudados foi obtido melhor desempenho no horário de pico, no qual o custo da energia é maior, o que possibilita um maior acúmulo de créditos.

Na minirrede do caso 3 o comportamento da geração de energia solar ao longo do dia segue um padrão razoavelmente previsível, atingindo um máximo próximo ao meio-dia e decrescendo até o anoitecer. Em contrapartida, na minirrede

do caso 4, o comportamento do recurso eólico é menos previsível, e a possibilidade de serem obtidas velocidades mais elevadas e períodos onde o nível de radiação solar é baixo ou inexistente confere ao sistema maior continuidade no que se refere à geração de energia elétrica.

Em períodos com altos níveis de produção de energia eólica e solar, as minirredes dos casos 3, 4 e 5 operam com excesso de energia, principalmente porque estes estão dimensionados considerando-se a pior condição, do ponto de vista da disponibilidade dos recursos renováveis.

Para os períodos com baixos níveis de produção de energia eólica e solar, se a bateria não estiver significativamente sobredimensionada, o sistema encontrará condições de operação com *déficit* de energia mais frequente.

Logo se o sistema de produção de eletricidade da minirrede não for conectado com a rede da Concessionária e for dimensionado para ser menor que o necessário para atender à carga, a bateria atingirá condições de descarga profunda mais frequentemente, e sua vida útil seguramente será reduzida. Se, ao invés disso, esse mesmo sistema for sobredimensionado, a bateria atingirá a condição de SOC = 100%, quase que todos os dias do ano, e sua vida útil será prolongada, possibilitando inclusive a transferência de energia para rede da Concessionária ou a operação em modo ilhado, ou seja independente da rede da Concessionária.

6 CONCLUSÕES

6 CONCLUSÕES

O objetivo principal desse trabalho foi modelar e simular o despacho econômico de energia elétrica de minirredes com várias fontes. As simulações foram implementadas no software GAMS. O projeto foi elaborado para um consumidor industrial hipotético cativo.

Foi verificado nas simulações realizadas que nos períodos com baixos níveis de produção de energia eólica e solar, caso ocorra sobredimensionamento, o sistema opera com déficit de energia, fato que ocorreu para as minirredes do cenário A. Este modo de operação provoca redução na vida útil das baterias.

Entretanto se o contrário ocorrer é possível realizar a transferência de energia para rede da Concessionária, obtendo com isso excedentes, fato que ocorreu nas minirredes do cenário B

De forma geral durante os estudos e simulações realizadas observou-se os seguintes pontos:

1. Compreender conceitos econômicos é fundamental para entender os mecanismos do despacho de energia no mercado elétrico.
2. A geração de energia elétrica em minirredes diminui a dependência do atual sistema centralizado de geração, representando uma opção rápida e eficiente para suprir a crescente demanda, devido sua menor complexidade de implantação, se comparada a projetos de expansão do sistema elétrico. Outros pontos que tornam as minirredes mais viáveis são:
 - Contínuo aumento da eficiência e robustez dos equipamentos geradores de energia;
 - Avanços constantes no desenvolvimento de novas tecnologias para sistemas de armazenamento, aumentando a confiabilidade da geração de energia com fontes intermitentes.
3. Grandes parcelas do fornecimento de energia elétrica continuam a ser administradas por meio de mecanismos regulamentados das empresas de energia tradicionais. No entanto, a direção em muitas partes do mundo - inclusive no Brasil - é no sentido de criar mercados de energia em substituição a parcelas do monopólio das empresas de energia tradicionais. Portanto compreender a forma de relacionamento entre empresas

instaladoras, consumidores finais e distribuidoras é muito importante para identificar quais são as dificuldades no processo de despacho de energia elétrica.

Com base na compreensão obtida do tema deste trabalho, os caminhos para desenvolvimento de trabalhos futuros podem ser:

- estudo de minirredes com outras fontes de energia, tais como microturbinas;
- estudo do despacho ambiental da minirrede;
- simulação incluindo cogeração para reaproveitamento da disponibilidade de calor e outros benefícios;
- estudo dos *tie-ins* e impactos comerciais inerentes ao acréscimo das minirredes aos atuais sistemas de distribuição e transmissão, tanto na operação quanto no planejamento;
- realizar o detalhamento dos componentes do projeto da minirrede para realizar estudo de qualidade de energia nos modos *on-grid* e *off-grid*.

Através deste trabalho, obteve-se uma nova forma de compreensão das técnicas e modelos utilizados pela indústria de energia elétrica, mais especificamente na área de geração juntamente com a responsabilidade de fazer uso da eficiência energética em cada processo.

REFERÊNCIAS

- [1] J. J. Grainger e W. D. Stevenson, *Power system analysis*. New York: McGraw-Hill, 1994.
- [2] F. D. Galiana e A. J. Conejo, “5 Economics of Electricity Generation”, *Taylor Francis Group*, nº 1, 2009.
- [3] Eduardo Nery, *Mercados e Regulação de Energia Elétrica*. São Paulo: Interciência, 2012.
- [4] Agência Nacional de Energia Elétrica, “Atlas de Energia Elétrica do Brasil”. 2008.
- [5] N. J. de Castro e A. Lafranque, Orgs., *Visão 2030: cenários, tendências e novos paradigmas do setor elétrico*, 1a edição. Rio de Janeiro, Brasil: Babilonia Cultura Editorial, 2015.
- [6] CPFL Energia, *Características dos Sistemas Elétricos e do Setor Elétrico de Países e /ou Estados Selecionados*. São Paulo: CPFL Energia, 2014.
- [7] Agência Nacional de Energia Elétrica, *Resolução Normativa nº 687*. 2017, p. 25.
- [8] Mauricio T. Tolmasquim, “Anuário Estatístico de Energia Elétrica”. Ministério de Minas e Energia, 2016.
- [9] Empresa de Pesquisa Energética, “Matriz Energética Brasileira 2030”. EPE, 2016.
- [10] Debora D. J. Penna, César L. V. de Vasconcelos, Michel I. de A. Ennes, André L. D. S. Lima, Maria E. P. Macieira, e Debora D. J. Penna, “Manual do Usuário NEWAVE”, CEPEL, Rio de Janeiro, Brasil, 16010, jul. 2013.
- [11] Mendonça, A., Dahl, C, “The Brazilian Electrical System Reform”, *Energy Policy*, vol. 27, nº 2, p. 73–83, fev. 1999.
- [12] Agência Nacional de Energia Elétrica, “Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST”. 2015.
- [13] A. L. de Oliveira, “Introdução à Economia”, *Unicentro*, vol. 1, nº 1, 2015.
- [14] André Moreira Cunha e Carlos Águedo Nagel Paiva, *Manual de Economia*, 1º ed. Brasília: Fundação Alexandre de Gusmão, 2008.
- [15] T. Ackermann, G. Andersson, e L. Söder, “Distributed generation: a definition1”, *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 57, nº 3, p. 195–204, 2001.
- [16] A. M. O. Pinzón, “Otimização da potência unitária dos geradores de energia numa micro-rede elétrica com geração híbrida fóssil/renovável.”, Unifei, Itajubá, 2015.
- [17] P. V. de Souza Borges, “Análise Regulatória e Econômica de Microrredes Elétricas no Brasil”, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2016.
- [18] N. W. A. Lidula e A. D. Rajapakse, “Microgrids research: A review of experimental microgrids and test systems”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, nº 1, p. 186–202, 2011.
- [19] C. T. Agência Nacional de Energia Elétrica, “Micro e Minigeração Distribuída”, *Sist. Compensação Energ. Elétrica Brasília DF Bras. Cent. Doc.*, 2014.
- [20] G. Fuchs, B. Lunz, M. Leuthold, e D. U. Sauer, “Technology overview on electricity storage”, *ISEA Aachen Juni*, 2012.
- [21] N. DiOrio, A. Dobos, e S. Janzou, “Economic analysis case studies of battery energy storage with SAM”, National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States), 2015.
- [22] T. B. Silva, L. Hollanda, e P. C. F. da Cunha, “Recursos energéticos distribuídos”, 2016.
- [23] E. F. Silveira, “Cenários de geração renovável em Fernando de Noronha”, 2014.

- [24] SEBRAE, “Guia de Energia Solar Fotovoltaica: Aplicação nas Micro e Pequenas Empresas”. 2016.
- [25] N. I. Nwulu e X. Xia, “Optimal dispatch for a microgrid incorporating renewables and demand response”, *Renew. Energy*, vol. 101, p. 16–28, fev. 2017.
- [26] M.A. Abdullah, A.H.M. Yatim, C.W. Tan, R. Saidur, “A review of maximum power point tracking algorithms for wind energy systems”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, p. 3220–3227, 2012.
- [27] Mauricio Tiomno Tolmasquim, “Energia Termelétrica: Gás Natural, Biomassa, Carvão, Nuclear”. Empresa de Pesquisa Energética, 2016.
- [28] Gabriel Fogagnoli de Freitas e José Eduardo Pauluk, “Estudo de Métodos de Despacho Econômico de Unidades Geradoras Termelétricas.”, Universidade Tecnológica Federal do Paraná Campus de Curitiba, Curitiba, Trabalho de Conclusão de Curso., 2014.
- [29] Agência Nacional de Energia Elétrica, “Nota Técnica 0056”. 2017.
- [30] M. Mahmoodi, P. Shamsi, e B. Fahimi, “Economic Dispatch of a Hybrid Microgrid With Distributed Energy Storage”, *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 6, nº 6, p. 2607–2614, nov. 2015.
- [31] J. Nocedal e S. J. Wright, *Numerical optimization*, 2nd ed. New York: Springer, 2006.
- [32] G. Binetti, A. Davoudi, D. Naso, B. Turchiano, e F. L. Lewis, “A Distributed Auction-Based Algorithm for the Nonconvex Economic Dispatch Problem”, *IEEE Trans. Ind. Inform.*, vol. 10, nº 2, p. 1124–1132, maio 2014.
- [33] Y.-Y. Lee e R. Baldick, “A Frequency-Constrained Stochastic Economic Dispatch Model”, *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, nº 3, p. 2301–2312, ago. 2013.
- [34] H. Gangammanavar, S. Sen, e V. M. Zavala, “Stochastic Optimization of Sub-Hourly Economic Dispatch With Wind Energy”, *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 31, nº 2, p. 949–959, mar. 2016.
- [35] J. Zhu, *Optimization of power system operation*. Piscataway, N.J.: Chichester: Wiley-IEEE; John Wiley [distribuidor], 2009.
- [36] M. S. Chamba e O. Añó, “Despacho óptimo de energía y reserva en mercados competitivos empleando algoritmos meta-heurísticos”, *Proc 2012 IEEE Argencon*, 2012.
- [37] L. Bayon, J. M. Grau, M. M. Ruiz, e P. M. Suarez, “The Exact Solution of the Environmental/Economic Dispatch Problem”, *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 27, nº 2, p. 723–731, maio 2012.
- [38] K. R. Apt, *Principles of constraint programming*. Cambridge; New York: Cambridge University Press, 2003.
- [39] X. Lai, L. Xie, Q. Xia, H. Zhong, e C. Kang, “Decentralized Multi-Area Economic Dispatch via Dynamic Multiplier-Based Lagrangian Relaxation”, *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 30, nº 6, p. 3225–3233, nov. 2015.
- [40] A. Geletu, “GAMS-Modeling and Solving Optimization Problems”, *Inst. Math. Dep. Oper. Res. Stoch. Ilmenau Univ. Technol.*, 2008.
- [41] F. S. Hillier e G. J. Lieberman, *Introdução à pesquisa operacional*. São Paulo: McGraw-Hill, 2006.
- [42] M. S. Bazaraa, H. D. Sherali, e C. M. Shetty, *Nonlinear programming: theory and algorithms*, 3rd ed. Hoboken, N.J.: Wiley-Interscience, 2006.
- [43] K. Oliveira, N. Nascimento, e O. R. Saavedra, “Uma abordagem via estratégias evolutivas para o despacho econômico considerando restrições de geração”, *IEEE Trans. Educ.*, vol. 6, nº 1, p. 42–50, 2008.

-
- [44] F. D. Galiana e A. J. Conejo, “5 Economics of Electricity Generation”, 2009.
 - [45] Richard E. Rosenthal, “GAMS UsersGuide”. GAMS Development Corporation, Washington, DC, USA, 2016.
 - [46] N. Andrei, *Nonlinear Optimization Applications Using the GAMS Technology*, vol. 81. Boston, MA: Springer US, 2013.
 - [47] Rita Mulcahy, *Preparatório para o Exame PMP*, 8º ed. Estados Unidos: RMC, 2013.
 - [48] CEMIG, “Simulador de Fatura para Ciente Cativo”, *Centrais Elétricas de Minas Gerais*, 2017.
 - [49] F. R. M. Enio Bueno Pereira, R. S. C. André Rodrigues Gonçalves, R. R. Francisco J. Lopes de Lima, G. M. T. Samuel Luna de Abreu, e J. G. de S. Silvia Vitorino Pereira, *Atlas Brasileiro Energia Solar*, 2º ed. São José dos Campos: INPE, 2017.
 - [50] Sidney Cerqueira, Osvaldo Saavedra, Shigeaki Lima, “Microgrid Economic Dispatch with Storage Systems by Particle Swarm Optimization”, *XII Simpósio Bras. Autom. Intel. SBAI*, 2015.
 - [51] Solargis, “Níveis de irradiação solar no mundo”, 2017.
 - [52] ENERCON GMBH, “Manual Geral da Linha de Produtos ENERCON”. 2015.