

Universidade Federal de Pernambuco
Centro de Tecnologia de Geociências
Departamento de Engenharia Elétrica
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

DAVIDSON DA COSTA MARQUES

**CONTROLE DE FREQUÊNCIA EM MICRORREDES UTILIZANDO
BATERIAS BASEADO NO APRENDIZADO EMOCIONAL DO CÉREBRO**

Recife

2023

DAVIDSON DA COSTA MARQUES

**CONTROLE DE FREQUÊNCIA EM MICRORREDES UTILIZANDO
BATERIAS BASEADO NO APRENDIZADO EMOCIONAL DO CÉREBRO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de doutor em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Processamento de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Ronaldo Ribeiro Barbosa de Aquino

Coorientador: Prof. Dr. Pedro André Carvalho Rosas

Recife

2023

Catálogo na fonte:
Bibliotecário Carlos Moura, CRB-4/1502

M357c Marques, Davidson da Costa.
 Controle de frequência em microrredes utilizando baterias baseado no
 aprendizado emocional do cérebro. / Davidson da Costa Marques. – 2023.
 208 f.: il.

 Orientador: Prof. Dr. Ronaldo Ribeiro Barbosa de Aquino.

 Coorientador: Prof. Dr. Pedro André Carvalho Rosas.

 Tese (doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de
 Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Recife, 2023.

 Inclui referências.

 1. Engenharia elétrica. 2. Geração distribuída. 3. Microrredes. 4. Controle
 de hierárquico de MR. 5. Sistemas de armazenamento de energia em baterias.
 6. BELBIC. 7. PSO. I. Aquino, Ronaldo Ribeiro Barbosa de (orientador).
 II. Rosas, Pedro André Carvalho (coorientador). III. Título.

621.3 CDD (22. ed.)

UFPE
BCTG/2023-151

DAVIDSON DA COSTA MARQUES

**CONTROLE DE FREQUÊNCIA EM MICRORREDES UTILIZANDO
BATERIAS BASEADO NO APRENDIZADO EMOCIONAL DO CÉREBRO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Processamento de Energia.

Aprovada em: 31/05/2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Ronaldo Ribeiro Barbosa de Aquino (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Pedro André Carvalho Rosas (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Gustavo Medeiros de Souza Azevedo (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. José Filho da Costa Castro (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Manoel Afonso de Carvalho Júnior (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Benemar Alencar de Souza (Examinador Externo)
Universidade Federal de Campina Grande

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a DEUS, por ter permitido chegar até aqui. Tenho CERTEZA que a sua presença me fortalece e sem Ele JAMAIS teria conseguido. Além disso, agradeço a Ele por ter permitido cruzar no meu caminho pessoas tão especiais. Obrigado Deus!

Aos meus pais Dimas da Costa Marques e Maria Verônica Barbosa Marques, por todo amor, carinho, paciência e dedicação - cada um da sua forma peculiar. Todo o apoio necessário nunca me faltou, cada um doando o seu melhor, incentivando a alcançar caminhos cada vez mais distantes sempre em busca dos sonhos. Amo vocês! Eternamente grato.

A minha namorada Joyce Mendonça, dedico este trabalho de forma enfática, que em muitas vezes na minha ausência constante (limitada pelo excesso de demanda) não deixou o sentimento ser interferido. Ainda grato por sua forma generosa de cuidar das situações mesmo diante das adversidades que fomos submetidos ao longo dessa jornada juntos. Espero agora retribuir de forma expressa todo o apoio recebido. Te amo!

Aos meus irmãos Dimas da Costa Marques Filho e Diego da Costa Marques pelo incentivo e amizade sincera ajudando a acreditar nos objetivos e apoiando sempre que solicitados. Não esquecendo também do meu sobrinho Vicente que nos trouxe a alegria da vida diante do amor mais puro que Deus nos mostra. Além da minha cunhada Marcella Auxiliadora por também sempre acreditar em mim.

A minha avó Maria de Sousa Barbosa "*In memoriam*", por todo amor doado incondicionalmente, ensinamentos simples e as palavras mais sábias que já escutei em toda minha vida.

A minha avó Margarida da Costa Marques "*In memoriam*", por demonstrar seus sentimentos do seu modo simples e acanhado.

A meus avôs Amaro e Amâncio "*In memoriam*", que não tive o prazer de conhecê-los.

A minha tia Severina de Sousa Barbosa, por toda generosa ao longo da minha vida.

Ao Professor Ronaldo Ribeiro Barbosa de Aquino, muito obrigado por nossa longa jornada juntos (12 anos), sempre com muita sinceridade nas palavras, ensinamentos, orientações e contribuições sem exitar. Meu eterno agradecimento por me receber em seu laboratório no meu primeiro contato no mundo acadêmico. Sempre disposto a tirar dúvidas, incentivar e acreditar que tudo sempre daria certo, com sua forma fraterna e ímpar de ser, muito obrigado por tudo Professor!

Ao meu grande amigo e coorientador Professor Pedro Rosas, por todos os ensinamentos acadêmicos, profissional e pessoal. Sempre com sua forma desbravadora, na qual me espelho em ter como uma pessoa de referência diante de tantos desafios. Grato eternamente por todas

as oportunidades e confiança proporcionada. Poucos possuem a sua capacidade brilhante de conduzir com maestria os problemas. Parabéns meu grande amigo!

Ao meu grande amigo Professor José Castro que esteve disposto a me auxiliar desde a primeira conversa. A ele devo agradecer com suas valiosas orientações e conselhos - dos mais diversos. Um amigo para vida toda que tenho um carinho enorme.

Também agradeço ao Professor Afonso de Carvalho, por ser um grande incentivador e apoiador, sempre que precisei, com suas vastas lições de vida. Ao Professor Gustavo Medeiros, que é para mim uma grande referência ética e profissional ao longo dos anos no DEE, sempre dispondo de ajuda seja quem for. Ao Professor Benemar Alencar de Souza por ter aceito participar da banca, que com toda certeza será de grande valia seus comentários sempre agregadores.

Aos demais professores (Alex Barros, Luiz Henrique, Francisco Neves, Geraldo Torres, Marcelo Cabral, Milde Lira, Otoni Nóbrega e Marcos André e os demais), pelo aprendizado e amizade.

Ao meu grande amigo Antonio Gustavo Muniz, por sua imensa paciência (em destaque) e principalmente por partilhar do seu conhecimento e assumir o compromisso com determinação de encontrarmos soluções dos problemas em comum da Tese. Obrigado também por sua forma peculiar de ser, com seu jeito engraçado de levar a vida e sua disposição de sempre ajudar. Tudo isso somando foram essenciais para elaboração do trabalho.

Aos meus grandes amigos: Guilherme Soriano, Jonata Campelo, Jeydson Lopes, Douglas Contente, Alex Ferreira, Bruno Jerônimo, Gustavo Duarte, Thiago Cordeiro, Joas Holanda, Pablo Tabosa, Amauri Bernardino e Inajá Fernando por todo o apoio nas horas difíceis, com palavras motivadoras. Muito obrigado pelas conversas, risadas, ajudas e companheirismo. Além de sempre estarem dispostos a ajudar e aconselhar.

Aos meus familiares Josinaldo Barbosa e Fabíola Soraia por sempre acreditar na minha caminhada acadêmica, abrindo as portas da sua casa em Recife para iniciar os estudos.

Aos companheiros do LAM: Mateus Oliveira, Caio César, Letácio Lins, Gabriel Muller, Josafá Tavares, Ruan Cartier e os demais que passaram tempos mais curtos. Obrigado por fazer o laboratório acontecer e mantermos nossa amizade e respeito ao longo da jornada.

Aos ex-companheiros do LEEQE: Filipe Cordeiro, Renato Leitão e Daniel Jardim pelo apoio, incentivo e amizade ao longo dos anos iniciais.

Em especial a Dona Valdete, representando o LDSP, meu muito obrigado pelo apoio, amizade e sua forma "mãe" zelosa de ser.

Ao CAPES, por todo apoio financeiro ao longo do tempo de doutorado, tornando essa conquista possível.

Agradeço a oportunidade de participar da concepção do Laboratório de Armazenamento e Mobilidade, que futuramente será aplicado a técnica apresentada na tese. O laboratório financiado

pela CPFL Energia via Programa de P&D da ANEEL, com recursos obtidos no âmbito do projeto Chamada Estratégica: PD-0397-3026/2017 - “Inserção de Sistema de Armazenamento em Configurações Múltiplas Para Suporte à Geração Eólica” e do projeto “PA3059 - Soluções de Apoio à Expansão da Infraestrutura de Recarga de Veículos Elétricos: Estações de Carregamento Integradas à Tecnologia de Baterias e Sistemas Fotovoltaicos (PV)”. Dedico ao gerente Guilherme Rissi – aqui representando a CPFL.

De uma forma geral, a todos os meus familiares e amigos que sempre foram presentes, cada um da sua forma, nesta jornada.

*"Para tudo há uma ocasião certa; há um tempo certo para cada propósito debaixo do
céu". (Ec 3, 1)*

RESUMO

O desenvolvimento atual das fontes de energia elétrica é impulsionado principalmente diante do uso dos Recursos Energéticos Distribuídos (RED), os quais abrangem a Geração Distribuída (GD) e os Sistemas de Armazenamento de Energia (SAE). As microrredes (MR) surgem como uma alternativa atraente para superar os desafios na integração dos RED ao sistema elétrico tradicional, com isso garantir confiabilidade e aproveitamento expressivo dos recursos energéticos. Em MR é necessário dispor de um sistema gerenciador para coordenar a operação de seus componentes, estando ela conectada ou desconectada da rede principal. No modo ilhado, o gerenciador da MR deve estabelecer os *setpoints* de operação dos RED de forma a não violar as restrições de operação, como despacho econômico, utilização de fontes renováveis e priorização de cargas. Além dos inúmeros benefícios, há desafios na integração deste conceito em sistemas de energia – como a exemplo o controle da estabilidade. Um dos requisitos mais importantes da operação da MR é manter a frequência dentro dos valores permitidos em um eventual desbalanço no caso Brasil 60Hz que está diretamente relacionada ao equilíbrio de carga e geração. Dessa forma, o uso de sistemas armazenadores de energia em baterias (BESS), os quais possuem tempo de resposta rápido e podem injetar ou absorver potência de forma a garantir a estabilidade da frequência na MR. Entretanto, a ação de controle possui tarefa fundamental para maior aproveitamento dos recursos. Como complemento do controle *droop*, o conceito de MR controlada através de controle secundária tem sido amplamente estudado para restabelecer tensão e frequência. No entanto, na literatura discutisse diversas alternativas de melhorias na implementação do *droop* convencional. O objetivo geral desta tese é propor um controlador inteligente baseado no processo de aprendizagem emocional do cérebro (*Brain Emotional Learning Based Intelligent Controller* – BELBIC) que seja capaz de minimizar, dentro dos valores permitidos, os desvios de frequência em MR. Os controladores biologicamente inspirados têm demonstrado êxito em diversas aplicações, principalmente em situações que apresentam perturbações e incertezas nas dinâmicas do sistema se comparado com outros controladores. Além disso, os parâmetros desse controlador são otimizados através da técnica baseada em enxame de partículas (PSO), resultando assim os parâmetros ótimos do controlador. Por fim, a partir dos resultados de simulação, demonstra-se um ganho expressivo também ao se utilizar o BELBIC, considerando que os SAE possuem limitações nas suas capacidades e com isso garantir a preservação da vida útil da bateria. As estratégias de controle propostas são simuladas em uma MR através da ferramenta Simulink, da plataforma computacional Matlab e os resultados serão comparados aos controladores *droop* e PI, sejam eles atuando como controles primários e/ou secundários.

Palavras-chave: geração distribuída; microrredes; controle de hierárquico de MR; sistemas de armazenamento de energia em baterias; BELBIC; PSO.

ABSTRACT

The current development of electrical energy sources is mainly driven by the use of Distributed Energy Resources (DERs), which include Distributed Generation (DG) and Energy Storage Systems (ESA). Microgrids (MR) emerge as an attractive alternative to overcome the challenges in the integration of grids to the traditional electrical system, thus ensuring reliability and significant use of energy resources. In MR it is necessary to have a management system to coordinate the operation of its components, being it connected or disconnected from the main grid. In the isolated mode, the MR manager must establish the setpoints of operation of the EEDs so as not to violate the operation restrictions, such as economic dispatch, use of renewable sources and prioritization of loads. Besides the numerous benefits, there are challenges in integrating this concept into power systems - such as stability control. One of the most important requirements of MR operation is to keep the frequency within the allowed values in an eventual unbalance in the case of Brazil 60Hz which is directly related to the balance of load and generation. Thus, the use of battery energy storage systems (BESS), which have fast response time and can inject or absorb power in order to ensure the stability of the frequency in the MR. However, the control action has a fundamental task for the best use of resources. As a complement to droop control, the concept of MR controlled by secondary control has been widely studied to restore voltage and frequency. However, several alternatives for improving the implementation of the conventional droop have been discussed in the literature. The overall objective of this thesis is to propose an intelligent controller based on the brain's emotional learning process (Brain Emotional Learning Based Intelligent Controller - BELBIC) that is capable of minimizing, within allowable values, frequency deviations in MR. Biologically inspired controllers have shown success in several applications, especially in situations that present disturbances and uncertainties in system dynamics compared to other controllers. Furthermore, the parameters of this controller are optimized using particle swarm based technique (PSO), thus resulting the optimal controller parameters. Finally, from the simulation results, an expressive gain is also demonstrated when using BELBIC, considering that ESS have limitations in their capacities and thus ensuring the preservation of battery life. The proposed control strategies are simulated in a RM through the Simulink tool, of the Matlab computing platform and the results will be compared to the droop and PI controllers, whether they act as primary and/or secondary controls.

Keywords: distributed generation; microgrids; MR hierarchical control; battery energy storage systems; BELBIC; PSO.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Conceito de controle coordenado de ESS e GD.	25
Figura 2 – Visão geral de uma Microrrede.	33
Figura 3 – Típica configuração de uma MR.	36
Figura 4 – Modos de operação de microrredes/nanorredes.	53
Figura 5 – Faixas de variação de tensão e frequência nos modos interligado e ilhado/isolado.	56
Figura 6 – Topologia genérica de MR com RED despacháveis e não despacháveis. . . .	57
Figura 7 – Controle dos RED despacháveis e não despacháveis nos modos de operação da MR.	58
Figura 8 – Diagrama típico de uma microrrede CA com controle hierárquico.	61
Figura 9 – Curva característica de regulação primária.	63
Figura 10 – Regulação inercial e regulação primária.	64
Figura 11 – Modelo simplificado de um inversor conectado à uma barra CA.	64
Figura 12 – Funções do controle <i>droop</i> P e Q.	66
Figura 13 – Ação do controle secundário sobre as curvas de <i>droop</i> em MRs. (a) f/P. (b) V/Q. .	69
Figura 14 – Topologias de controles secundários em MR. (a) Centralizada. (b) Descentralizada. (c) Distribuída.	69
Figura 15 – Topologia do RED com fonte primária ideal.	72
Figura 16 – Topologia do RED com modelo completo do lado CC.	73
Figura 17 – Controle de corrente em referencial $\alpha\beta$	75
Figura 18 – Controle de corrente em referencial dq	76
Figura 19 – Topologia VSC controlado em tensão no referencial $\alpha\beta$	77
Figura 20 – Topologia VSC controlado em tensão no referencial dq	77
Figura 21 – Diagrama de bloco do controle de corrente do VSC.	79
Figura 22 – Modelo elétrico do modo de operação <i>grid-forming</i>	80
Figura 23 – Modelo elétrico do modo de operação <i>grid-feeding</i>	80
Figura 24 – Topologia do VSC operando no modo <i>grid-feeding</i> com fonte despachável. .	81
Figura 25 – Topologia do VSC operando no modo <i>grid-feeding</i> com fonte não despachável. .	82
Figura 26 – Modelo elétrico do modo de operação <i>grid-supporting</i> controlado por corrente. .	82
Figura 27 – Modelo elétrico do modo de operação <i>grid-supporting</i> controlado por tensão. .	82
Figura 28 – Controle do VSC do BESS.	83
Figura 29 – Solução BESS Narada.	84
Figura 30 – Diagrama esquemático do modelo Battery do MATLAB®/Simulink®	86
Figura 31 – Parâmetros da bateria do MATLAB®/Simulink®	86
Figura 32 – Topologia do modelo completo do BESS.	87
Figura 33 – Topologia do modelo completo do BESS.	88

Figura 34 – Topologia de controle do sistema FV.	90
Figura 35 – Modelo da célula FV.	90
Figura 36 – Topologia do arranjo FV.	91
Figura 37 – Modelo computacional de aprendizagem emocional na amígdala.	94
Figura 38 – Sistema límbico.	97
Figura 39 – Córtex pré-frontal.	98
Figura 40 – Amígdala.	98
Figura 41 – Conexões da amígdala com outros componentes do sistema límbico.	99
Figura 42 – Cortéx pré-frontal.	101
Figura 43 – Tálamo.	103
Figura 44 – Córtex sensorial.	104
Figura 45 – Hipocampo.	104
Figura 46 – Estrutura do modelo computacional simplista do sistema límbico.	106
Figura 47 – Modelo computacional do aprendizado emocional do sistema límbico.	107
Figura 48 – Estrutura do modelo emocional do cérebro baseada na amígdala.	109
Figura 49 – Configuração do sistema de controle usando BELBIC.	111
Figura 50 – Movimentação das partículas PSO.	115
Figura 51 – Fluxograma do PSO.	116
Figura 52 – Estrutura Elétrica MR implementada para simulações.	119
Figura 53 – Estrutura das conexões da MR implementada.	120
Figura 54 – Topologia do controle <i>droop</i> aplicado ao VSC controlado por corrente associado ao BESS.	122
Figura 55 – Estrutura do CCMR e controle primário.	122
Figura 56 – Estrutura de controle interno.	123
Figura 57 – Região <i>deadzone</i> da frequência no CCMR.	123
Figura 58 – Estrutura de controle <i>droop</i> do conversor do BESS.	125
Figura 59 – Diagrama de blocos controle primário - <i>Droop</i>	125
Figura 60 – (a) Controle secundário centralizado e (b) Controle secundário distribuído.	126
Figura 61 – Controle secundário centralizado com ganhos do controle PI variáveis.	128
Figura 62 – Estrutura de controle PI do conversor do BESS.	130
Figura 63 – Estrutura de controle BELBIC do conversor do BESS.	132
Figura 64 – Modelo simplificado representativo da máquina síncrona e respectivos reguladores de velocidade e de tensão.	133
Figura 65 – Modelo dinâmico simplificado representativo do regulador de velocidade e máquina primária de um grupo térmico diesel.	133
Figura 66 – Modelo adaptação do sistema de excitação AC1A do padrão IEEE®421, <i>copyright</i> IEEE 2005.	135
Figura 67 – Diagrama de BELBIC no simulink.	136
Figura 68 – Diagrama de blocos do controlador BELBIC.	137

Figura 69 – Esquema de controle dos controladores, que inclui <i>deadzone</i> no sinal de entrada e um limitador de potência de referência.	141
Figura 70 – Análise da frequência utilizando controle <i>droop</i> com variação na <i>deadzone</i>	143
Figura 71 – Análise da potência utilizando controle <i>droop</i> com variação na <i>deadzone</i>	143
Figura 72 – Analogia de um bando de pássaros em um espaço de busca de 3D.	145
Figura 73 – Simulações do controlador BELBIC para escolha dos parâmetros através do PSO - análise da frequência.	147
Figura 74 – Simulações do controlador BELBIC para escolha dos parâmetros através do PSO - mais detalhadamente.	148
Figura 75 – Simulações do controlador BELBIC para escolha dos parâmetros através do PSO - análise da potência.	149
Figura 76 – Análise da frequência utilizando controlador BELBIC.	150
Figura 77 – Análise da potência utilizando controlador BELBIC.	150
Figura 78 – Pesos dos BELBIC.	152
Figura 79 – Sinais dos controladores BELBIC.	153
Figura 80 – Sinais de saída(MO) dos controladores BELBIC.	153
Figura 81 – Análise da frequência utilizando controle BELBIC com variação na <i>deadzone</i>	154
Figura 82 – Análise da potência utilizando controle BELBIC com variação na <i>deadzone</i>	155
Figura 83 – Comparativo da frequência da MR entre os controles.	156
Figura 84 – Comparativo da potência do BESS(injetada/absorvida) entre os controles.	157
Figura 85 – Potência total das cargas entre os controles	158
Figura 86 – Potências nas barras nas cargas.	159
Figura 87 – Comportamento das potências da MR utilizando os controles (a) <i>Droop</i> , (b) PI e (c) BELBIC.	160
Figura 88 – Comportamento das potências da microrrede sem o BESS.	161
Figura 89 – Tensão trifásica do gerador.	162
Figura 90 – Corrente trifásica do gerador.	163
Figura 91 – Tensão do BESS durante a simulação.	164
Figura 92 – Corrente do link CC do BESS durante a simulação.	165
Figura 93 – Tensão do BESS durante a simulação.	166
Figura 94 – Corrente do BESS durante a simulação.	167
Figura 95 – (a) Característica de descarga de corrente em 0.43478C (217.3913A). (b) $\varepsilon_0 = 390.3692, R = 0.0072, K = 0.0053941, A = 30.2313, B = 0.12212$	168
Figura 96 – Análise do comportamento do SoC durante a simulação.	170
Figura 97 – Curvas Características I-V e P-V.	171
Figura 98 – Tensão do link CC da FV.	173
Figura 99 – Tensão CA na saída do VSC na UFV.	174
Figura 100 – Corrente CA na saída do VSC na UFV.	174
Figura 101 – Comportamento das potências da MR utilizando o controle <i>droop</i>	176

Figura 102–Comportamento das potências da MR utilizando o controle PI.	177
Figura 103–Comportamento das potências da MR utilizando o controle BELBIC.	178
Figura 104–Comparativo dos controles da frequência da MR.	179
Figura 105–Comparativo entre as potências do BESS.	179
Figura 106–Comparativo do estado de carga do BESS.	180
Figura 107–Tensão do link CC da FV.	181
Figura 108–Corrente CA na saída do VSC da UFV.	182
Figura 109–Corrente de saída do VSC em fase com a tensão da MR.	182

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características de Microgeradores quanto à conexão às microrredes.	35
Tabela 2 – Requisitos mínimos em função da potência instalada.	39
Tabela 3 – Normas e padrões recomendados IEEE.	41
Tabela 4 – Normas e padrões recomendados IEC.	42
Tabela 5 – Limites de Frequência - Comparação (PRODIST x IEEE x IEC).	42
Tabela 6 – PRODIST: Condições de Operação - Limites de Frequência.	43
Tabela 7 – PRODIST: Condições de Operação - Limites de Frequência (com corte de carga ou de geração).	43
Tabela 8 – IEEE 1547: Requisitos de manutenção de frequência para RED.	43
Tabela 9 – Normas Técnicas Nacionais relacionadas aos sistemas fotovoltaicos das Nanorredes.	45
Tabela 10 – Normas Técnicas Nacionais relacionadas aos inversores das Nanorredes. . .	45
Tabela 11 – Normas Técnicas Nacionais relacionadas as GDs das Nanorredes.	46
Tabela 12 – Normas Técnicas Nacionais relacionadas aos equipamentos das Nanorredes.	46
Tabela 13 – Normas Técnicas Nacionais relacionadas aos sistema de carregamento das Nanorredes.	46
Tabela 14 – Normas Técnicas Nacionais relacionadas aos sistemas fotovoltaicos das Nanorredes.	47
Tabela 15 – IEEE: Normas técnicas internacionais para conexão de fontes de geração fotovoltaica.	49
Tabela 16 – IEC, EN e VDE: Normas técnicas internacionais para conexão de fontes de geração fotovoltaica.	50
Tabela 17 – ABNT: Normas técnicas nacionais para fontes de geração fotovoltaica. . . .	51
Tabela 18 – Requisitos básicos para operação do SAE.	52
Tabela 19 – Limites de tensão e frequência – Padrão IEEE versus IEC.	54
Tabela 20 – Detalhes do sistema da MR.	121
Tabela 21 – Limites superior e inferior dos parâmetros da função de partícula inicial. . .	146
Tabela 22 – Hiperparâmetros do PSO	146
Tabela 23 – Resultados da otimização dos parâmetros utilizando PSO	147
Tabela 24 – Resultados da otimização dos parâmetros utilizando PSO - que atendem os critérios.	151
Tabela 25 – Características do módulo fotovoltaico.	171
Tabela 26 – Irradiação ao longo do tempo no Cenário 2.	175

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BEL	<i>Brain Emotional Learning</i>
BELBIC	<i>Brain Emotional Learning Based Intelligent Controller</i>
BESS	<i>Battery Energy Storage System</i>
BMS	<i>Battery Monitoring System</i>
BT	Baixa Tensão
CCCV	<i>Constant Current, Constant Voltage</i>
CCMR	Central de Controle da Microrrede
CE	Chave Estática
CL	<i>Controller Load</i>
CSC	<i>Current Sourced Converter</i>
DER	<i>Distributed Energy Resources</i>
DoD	<i>Depth of Discharge</i>
ENEL	Entidade Nacional de Eletricidade
ERAC	Regional de Alívio de Carga
EMS	<i>Energy Management System</i>
ESS	<i>Energy Storage System</i>
EV	<i>Electrical Vehicles</i>
FV	Fotovoltaico
GA	<i>Genetic Algorithm</i>
GD	Geração Distribuída
GLD	Gerenciamento pelo Lado da Demanda
HIL	<i>Hardware In the Loop</i>

IAE	<i>Integral Absoluta do Erro</i>
IEC	<i>International Eletrotecnical Comission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Eletronics Engineers</i>
IGBT	<i>Insulated-Gate Bipolar Transistors</i>
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
ISE	<i>Integral of Square Error</i>
ITAE	<i>Integral of Time Multiplied by the Absolute Value of Error</i>
LAM	Laboratório de Armazenamento e Mobilidade
LPF	<i>Lowpass Filter</i>
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
NBR	Norma Técnica Brasileira
NERC	<i>North American Electric Reliability Corporation</i>
OM	Operador de Mercado
ORD	Operador da Rede de Distribuição
PAC	Ponto de Acoplamento Comum
PCC	<i>Point of Common Coupling</i>
PCH	Pequenas Centrais Hidrelétricas
PCS	<i>Power Conversion System</i>
PI	Proporcional-Integral
PLL	<i>Phase-Lock-Loop</i>
PR	Proporcional-Ressonante
PRODIST	Procedimentos de Distribuição
PSO	<i>Particle Swarm Optimization</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
RED	Recursos Energéticos Distribuídos
RVA	Regulador de Tensão Automática

SAE	Sistemas de Armazenamento de Energia
SCE	<i>A Southern California Edison Company</i>
SCS	Controle Secundário
SEE	Sistemas de Energia Elétrica
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SIN	Sistema Interligado Nacional
SMA	Sistemas Multiagentes
SoC	<i>Estado inicial de carga</i>
STC	<i>Standard Test Conditions</i>
SVPWM	<i>Space Vector Pulse Width Modulation</i>
TBT	<i>Technical Barriers to Trade</i>
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
UFV	Usina Fotovoltaica
UL	<i>Underwriters Laboratories</i>
UPS	<i>Uninterruptible Power Source</i>
VDE	<i>Verband der Elektrotechnik</i>
VSC	<i>Voltage-Sourced Converter</i>
WEC	<i>World Energy Council</i>
WTO	<i>World Trade Organization</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

η	Eficiência
α	Velocidade de aprendizagem
β	Taxa de aprendizagem
ΔV	Ganho amígdala
ΔW	Ganho córtex orbitofrontal
ε	Limite <i>deadzone</i>
A_i	Sinal da amígdala
A_{th}	Sinal máximo de <i>SI</i>
$c_{1,2}$	Constantes de buscas local e global do PSO
I_{mp}	Corrente de máxima potência
I_{SC}	Corrente de curto circuito
d_c	<i>Duty Cycle</i>
$e(t)$	Valor do erro na malha de controle
ES	Sinal emocional
f_{MR}	Frequência da microrrede
$J(k)$	Função objetivo (<i>fitness</i>)
$G(s)$	Função de transferência
G_{best}	<i>Global Best</i>
I	Irradiação
K	Número de iterações PSO
$k_{1,2,3,4,5,6}$	Parâmetros do controlador BELBIC
MO	Saída do modelo
OC_i	Córtex orbitofrontal
P_{best}	<i>Position Best</i>

P_{bess}	Potência do BESS
P_{fv}	Potência da fotovoltaica
R_o	Reforço interno para o córtex orbitofrontal
SI_i	Entrada sensorial
$u(t)$	Sinal de controle
v	Velocidade da partícula no PSO
V	Peso da amígdala
$V_{bat_{ref}}$	Tensão de referência da bateria
V_{cc}	Tensão do link CC
V_s	Tensão barra
V_t	Tensão terminal
V_{UEL}	Limitadores de sub-excitação
V_{oc}	Tensão de circuito aberto
V_{mp}	Tensão de máxima potência
V_{OEL}	Limitadores de sobre-excitação
W	Peso da córtex orbitofrontal
x	Posição da partícula no PSO
$y(p)$	Saída da planta
$y(r)$	Saída de referência
w_{min}	Peso inercial máximo do PSO
w_{max}	Peso inercial mínimo do PSO

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
1.1	Motivação e relevância	26
1.2	Objetivos	28
1.3	Contribuições	29
1.4	Organização textual	30
2	MICRORREDES	32
2.1	Introdução	32
2.2	O conceito de Microrrede	35
2.3	Padrões e requisitos gerais de conexão	37
2.3.1	Critérios técnicos e operacionais conforme o PRODIST	37
2.3.2	Requisitos gerais para conexão de consumidores ou cargas	38
2.4	Normas e padrões internacionais relativos aos padrões e requisitos de conexão de Microrredes	40
2.5	Normas e padrões internacionais relativos aos padrões e requisitos de conexão de Nanorredes	40
2.5.1	Normas internacionais de organismos normativos	41
2.5.2	Normas de distribuidoras	44
2.5.3	Normas nacionais	45
2.6	Normas - Conexão de fontes de geração fotovoltaica	48
2.6.1	Normas técnicas internacionais	48
2.6.2	Normas técnicas nacionais	48
2.7	Operação de sistemas de armazenamento de energia	48
2.7.1	Normas - Conexão de sistemas de armazenamento	52
2.8	Modos de operação	53
2.8.1	Modo conectado	54
2.8.2	Modo ilhado	55
2.8.3	Modo de transição	56
2.9	Ilhamento de Microrredes	57
2.9.1	Modos de controle em ilhado e conectado	57
2.9.2	Chaveamento dos controles dos conversores	58
2.9.3	Estudos relacionados ao ilhamento de MRs	59
2.10	Controle Hierárquico	60
2.10.1	Controle Primário	62
2.10.2	Controle Secundário	68

2.10.3	Controle Terciário	70
2.11	Conclusão do capítulo	71
3	MODELOS DOS RED	72
3.1	Introdução	72
3.2	Sistema de conversão de potência CC/CA	73
3.2.1	Conversor CC/CA	73
3.2.2	VSC controlado por corrente	74
3.2.3	VSC controlado por tensão	76
3.2.4	Controles internos	78
3.2.5	Modos de operação do conversor CC/CA	79
3.3	Fontes primárias e sistema de conversão CC/CC	83
3.3.1	Modelo do BESS	83
3.3.1.1	<i>Introdução</i>	<i>84</i>
3.3.1.2	<i>Estrutura do BESS</i>	<i>84</i>
3.3.2	Modelo do sistema fotovoltaico	89
3.4	Conclusão do capítulo	91
4	SISTEMA DE CONTROLE BASEADO NO APRENDIZADO EMOCIO- NAL DE MAMÍFEROS	93
4.1	Controlador inteligente baseado no aprendizado emocional do cérebro . . .	93
4.1.1	Processo emocional	95
4.1.2	Sistema límbico	96
4.1.2.1	<i>Amígdala</i>	<i>98</i>
4.1.2.2	<i>Córtex orbitofrontal</i>	<i>101</i>
4.1.2.3	<i>Tálamo</i>	<i>103</i>
4.1.2.4	<i>Córtex sensorial</i>	<i>103</i>
4.1.2.5	<i>Hipocampo e hipotálamo</i>	<i>103</i>
4.1.3	Modelagem matemática do sistema límbico	105
4.1.4	Definição dos sinais emocionais e estímulos sensoriais	110
4.2	Otimização por Enxame de Partículas	112
4.2.1	Os termos utilizados no algoritmo PSO	113
4.2.2	Estrutura do algoritmo	113
4.3	Conclusão do capítulo	118
5	MODELOS, CONTROLES, PARÂMETROS E AJUSTES DA MR	119
5.1	Estrutura da MR	119
5.2	Controle Droop	124
5.3	Estratégias de Controle Secundário	127
5.4	Controle PI para restauração da frequência da MR	130

5.5	Controle BELBIC para restauração da frequência da MR	131
5.6	Implementação da microrrede em Simulink	132
5.7	Conclusão do capítulo	138
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	139
6.1	Cenários e pontos de operação	140
6.1.1	Cenário 1 - Operação ilhada ocorrendo variação de carga	141
6.1.1.1	<i>Análise da deadzone aplicada ao controle droop</i>	<i>141</i>
6.1.1.2	<i>Projetando um controlador BELBIC e propondo o PSO para o ajuste dos parâmetros do controlador</i>	<i>144</i>
6.1.1.3	<i>Comparativo entre os controladores utilizados</i>	<i>155</i>
6.1.1.4	<i>Grandezas elétricas do Gerador à Diesel</i>	<i>161</i>
6.1.1.5	<i>Análise dos resultados do controle utilizando o BESS</i>	<i>163</i>
6.1.1.6	<i>Grandezas elétricas do VSC do sistema fotovoltaico</i>	<i>170</i>
6.1.2	Cenário 2 - Microrrede operando com variação da geração fotovoltaica e diminuição de carga	175
6.1.3	Análise prescritiva dos cenários 1 e o cenário 2.	178
6.2	Conclusão	183
7	CONCLUSÃO	184
7.1	Trabalhos futuros	186
7.2	Trabalhos publicados	188
	REFERÊNCIAS	190

1 INTRODUÇÃO

O Sistema Elétrico de Potência (SEP) é baseado em grandes unidades geradoras, tipicamente hidrelétricas, nucleares e termelétricas movidas a combustíveis fósseis e seus derivados; com linhas de transmissão e sistemas de distribuição interligando as usinas de geração aos grandes centros consumidores que estão localizados em regiões remotas. Nesse modelo centralizado de produção de energia elétrica, os investimentos para transmissão e distribuição são de grande porte, além do alto grau de complexidade para operação do sistema (MEDINA et al., 2014). No Brasil, a geração centralizada tem como base o uso de grandes usinas hidroelétricas.

No momento atual, o desenvolvimento energético tem sido fortemente baseado na Geração Distribuída (GD) de energia, significando uma nova alternativa promissora sendo implantada em gerações de pequena escala próximas às unidades consumidoras. De fato, a descentralização do sistema de geração tornou possível ao consumidor, antes com forte dependência da energia advinda da rede elétrica convencional proveniente de grandes centrais conectadas as redes de transmissão e distribuição, produzir sua própria energia localmente. Em 2012, através da Resolução Normativa nº 482/2012, foi instituído o conceito e as diretrizes da micro e minigeração distribuída no Brasil para produtores com fontes de geração de energia renovável ou cogeração qualificada com conexão à rede, sendo considerado um marco histórico da GD no país (NETO; COSTA; VASCONCELOS, 2014).

A GD pode ser determinada como fonte de energia que se conecta diretamente à rede de distribuição ou depois do medidor de energia do consumidor. De modo geral, a GD pode ser considerada no conceito mais amplo de Recursos Energéticos Distribuídos (RED), a inclusão não apenas GD mas também sistemas de armazenamento de energia (SAE) e cargas responsivas (PEPERMANS et al., 2005).

De fato, nos últimos anos, há uma aceleração da inserção dos RED, justificada principalmente pela redução dos custos atrelados, a disseminação das tecnologias e pelo compromisso mais ativo dos consumidores. Ao considerar os diferentes RED, a GD tem papel relevante, sendo a modalidade de geração com crescimento exponencialmente no país. De acordo com os dados do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), a capacidade instalada no Sistema Interligado Nacional (SIN) de eólica representa 13,7% da matriz elétrica brasileira em 2023 e há expectativa de chegar aos 15,5% ao fim de 2027, enquanto a fotovoltaica (FV) corresponde 4,4% em 2023, podendo atingir 7,9% até o fim de 2027 (ONS, 2023).

A integração dos RED à rede e a sua vasta aplicação de equipamentos de eletrônica de potência tem tornado as redes cada vez mais distribuídas, flexíveis e inteligentes. Porém, múltiplos desafios técnicos devem ser avaliados para garantir níveis de confiabilidade e que os potenciais benefícios da GD sejam alcançados (GUERRERO et al., 2010; OLIVARES et al.,

2014). Os destaques são para: confiabilidade e sustentabilidade na operação, gerenciamento e integração dos RED no SEP. Neste contexto, as Microrredes (MRs) mostram-se como uma alternativa com grande potencial para superar os desafios na integração dos RED (GUERRERO et al., 2010; BIDRAM; DAVOUDI, 2012).

O conceito de Microrrede é definido, segundo Lasseter (LASSETER, 2002), como um agrupamento de geradores distribuídos, sistemas armazenadores de energia (ESS, do inglês *Energy Storage System*) e cargas, que são vistos pela rede como uma entidade elétrica e econômica única, por meio de uma interface flexível e controlável que conecta a MR à rede principal. A MR tem a capacidade para operar em modo ilhada (totalmente desconectada do sistema de distribuição principal) e conectada. Quando operando ilhada, a MR deve garantir o fornecimento de energia elétrica de forma ininterrupta com confiabilidade e qualidade aos seus consumidores. Diante das características descritas, as MRs são consideradas como fundamentais nos futuros sistemas de energia visando uma transição para as redes elétricas inteligentes (LIDULA; RAJAPAKSE, 2011).

Diante da relevância da implementação de MRs, diversos estudos vêm sendo desenvolvidos, podendo-se destacar como principais as áreas de controle e gerenciamento das MRs. Os estudos direcionados para o gerenciamento da MR, no modo conectado, visam otimizar eletricamente e economicamente por meio do nível mais alto de operação do sistema elétrico ao qual a MR estiver interligada. Já no modo ilhado, o gerenciamento da MR busca utilizar os recursos da MR que garantam o fornecimento de energia (GREEN; PRODANOVIĆ, 2007).

Ao analisar os estudos de controle de uma MR, busca-se propor novas estratégias e utilizar ou aperfeiçoar as existentes para que permitam a operação de forma confiável e estável. As estratégias de controle para o modo ilhado da MR apresentam diversos desafios, ao considerar a necessidade de controle e gerenciamento de suas grandezas elétricas e fornecimento de energia. Considerando os dois modos operativos, têm-se na alternância deles a transição, que, assim como as anteriores, é uma área de relevância nos estudos de MRs, uma vez que o desempenho do controle durante o ilhamento é fundamental para manter a MR em operação ilhada e que garanta o fornecimento ininterrupto de energia às cargas, e uma capacidade de reconexão à rede elétrica sem grandes distúrbios que garantam à operação normal conectada após um período ilhado (KATIRAEI; IRAVANI; LEHN, 2005; OLIVARES et al., 2014).

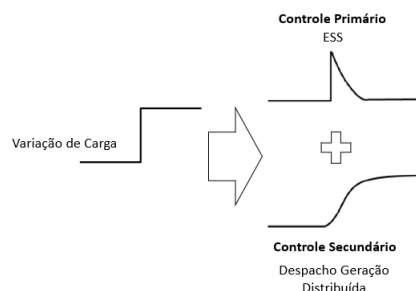
Para lidar com as dificuldades encontradas na operação da microrrede no modo ilhado, uma série de métodos apropriados de controle são propostos, que podem ser divididos em melhorias do controle *droop* (WU et al., 2015; GUERRERO et al., 2008) e métodos de controle secundário (GUERRERO et al., 2010; SANHUEZA et al., 2016). No trabalho (AHMADI et al., 2015) um *droop* aprimorado baseado em lógica fuzzy utiliza um método de controle para equilibrar o estado de carga dos SAE em GD. No entanto, a perturbação do alimentadores e as cargas não são considerados. Uma método de controle *droop* foi proposto em (CHIANG;

JEN; YOU, 2016) para compartilhar as correntes da GD e restaurar a tensão do barramento simultaneamente sem uma centralização do controlador secundário. Em (DÍAZ et al., 2015), uma abordagem de lógica fuzzy para o controle *droop* baseado num modelo inteligente foi estabelecido para regular a frequência MG e a amplitude de tensão simultaneamente.

Além disso, nos trabalhos de (GUERRERO et al., 2010; SHAFIEE; GUERRERO; VASQUEZ, 2013), um controle secundário distribuído/centralizado, como os principais métodos, usou-se a restauração da amplitude de tensão e frequência para os valores nominais. Em (BIDRAM; DAVOUDI; LEWIS, 2014), uma estratégia de controle cooperativo de duas camadas é apresentada para controlar simultaneamente a tensão/frequência, bem como a medida que potências ativa/reactiva flui, onde somente as informações próprias e dos vizinhos de cada unidade GD são necessárias. As estratégias de controle secundário aprimoradas, como os algoritmos baseado na teoria dos grafos, controle preditivo e multi-agente, são apresentados para aumentar a estabilidade dinâmica e precisão do potência compartilhada sob condições ambientais variáveis (SIMPSON-PORCO et al., 2015; LI et al., 2015).

O principal conceito para operação ilhada ou isolada envolve o controle coordenado do SAE e outras unidades de GD, como mostra a Figura 1. Assim sendo, no modo ilhado surgem alguns desafios de estabilidade. Esses desafios se devem principalmente à variabilidade das fontes geradoras e da demanda, causando desbalanço entre carga e geração, mesmo na presença de SAE (ARUNAN; RAVISHANKAR; AMBIKAI RAJAH, 2017).

Figura 1 – Conceito de controle coordenado de ESS e GD.



Fonte: Adaptado (KIM et al., 2010).

Os SAE permitem melhorar as condições de estabilidade em redes isoladas, particularmente a nível da regulação primária de frequência, contribuindo para a capacidade de reserva primária destes sistemas. Em situações específicas como excesso/déficit de produção, os SAE podem absorver/injetar potência na rede, contribuindo eficazmente para o balanço entre a produção e o consumo, e consequentemente, para suavizar os desvios de frequência excessivas que possam ocorrer mediante determinadas perturbações. Além disso, os SAE podem ainda permitir aplicações no âmbito da gestão da energia, por exemplo, o deslocamento temporal de energia de origem convencional e/ou renovável em função da geração/consumo previstos, possibilitando descargas durante períodos de tempo prolongados ou absorver energia durante

períodos de baixo consumo para injetar na rede em períodos de maior consumo. Desta forma, contribuirão para a redução do preço da energia elétrica e para o nivelamento de cargas.

No controle primário, o SAE tenta estabilizar a frequência e a tensão localmente com uma ação de resposta rápida. Assim, a frequência e a tensão da microrrede podem ser reguladas aos valores de normalidade (TANABE et al., 2009; KIM et al., 2010). Entretanto, a capacidade de controle do balanceamento de energia do SAE é limitada por sua capacidade de disponibilidade do sistema. Por consequência, a potência do SAE deve voltar a zero assim que possível, através da central de controle da microrrede, a fim de garantir a máxima reserva de energia e reduzir o consumo de energia armazenada. Já o controle secundário, por sua vez, garante a energia necessária para retornar a energia de saída do SAE a zero, injetando potência ativa e reativa através das unidades GD disponíveis. Esses pontos de ajuste de saída de potência são produzidos na central com base em medições no SAE e nas unidades GD despachadas. Então, cada controlador de carga tenta garantir que a potência real da unidade GD está em conformidade com o ponto de ajuste da potência recebida pela central de controle.

Em suma, o sistema de armazenamento de energia em Baterias (BESS, do inglês *Battery Energy Storage System*) é uma alternativa eficiente no controle de frequência devido à rápida resposta as perturbações. Portanto, as tecnologias de armazenamento melhoram significativamente a estabilidade e confiabilidade do sistema (DIVYA; ØSTERGAARD, 2009).

No sentido de mitigar os riscos acima referidos, devem ser adotadas estratégias de controle de ação rápida que permitam controlar a frequência do sistema diante de alguma ocorrência de perturbações que afetem o comportamento dinâmico dos sistemas isolados, sejam elas provocadas pela súbita perdas das unidades de geração, variação da carga ou ainda em decorrência da variabilidade da produção renovável. A estratégia de controle proposta apresentará um método inteligente de controle para melhorar o desempenho no desvio da frequência da microrrede, cujo controle é baseado no aprendizado emocional do cérebro e os seus respectivos parâmetros do controlador serão otimizados utilizando uma técnica de otimização de enxame de partículas.

1.1 Motivação e relevância

Considerando o conhecimento difundido dos benefícios esperados na implementação de SAE em sistemas elétricos, estes ainda possibilitam novas alternativas no estudo de SAE aplicados a microrrede. Portanto, estudar as técnicas de controle que deverão ser implementadas para que os sistemas cumpram as funções solicitadas de forma adequada. Diante disso, propor um controle de ação rápida que permita estabilizar a frequência do sistema na ocorrência de perturbações que afetem o comportamento dinâmico dos sistemas isolados; bem como as causadas pela súbita perda de unidades de geração, variação da carga ou ainda em resultado da variabilidade da produção renovável, que vem se mostrando uma área de grande relevância.

Uma vez que o foco da tese é a estabilidade de frequência em microrredes, a implantação de SAE em baterias associado ao método inteligente de controle (do inglês *Brain Emotional Learning Based Intelligent Controller* – BELBIC), surge como uma alternativa para manter a estabilidade e melhorar a qualidade do fornecimento de energia elétrica em microrredes. A utilização do SAE na aplicação proposta, possibilitará operar de modo a variar seu fornecimento de potência de acordo com o sinal do desvio de frequência observado na microrrede, como será descrito ao longo deste trabalho.

Na literatura é possível encontrar uma grande diversidade de técnicas relacionadas ao tópico abordado e algumas referências importantes serão citadas a seguir.

O sistema emocional pode ser considerado como um elemento importante na robustez e capacidade da adaptação, por este motivo, atualmente, várias aplicações na área da inteligência computacional e de controle estão explorando o processo de aprendizagem e a resposta emocional. A principal função da emoção é avaliar os estímulos e focar a atenção do sistema sobre os sinais que mais contribuem para alcançar os objetivos do sistema. Ao invés de usar os recursos em todos os estímulos sensoriais, a avaliação emocional pode ajudar a se concentrar em estímulos relevantes, que são mais decisivos. Em (CÉSAR et al., 2017), estudou-se a performance de um controle baseado no aprendizado emocional do cérebro - *brain emotional learning* (BEL) aplicado a um amortecedor magnético.

No trabalho de (KHORASHADIZADEH; MAHDIAN, 2016), foi utilizado um controle BELBIC para o controle de tensão num conversor *boost* DC-DC. Em (YI, 2015) foi apresentado um controle robusto de modo deslizante bio-inspirado, cuja a estratégia era baseada no BELBIC, o qual era aplicado manipulação robótica com incertezas de rastreamento. (SADEGHIEH; ROSHANIAN; NAJAFI, 2012) propôs um rastreamento de posição para servomotor no sistema eletro-hidráulico, baseando-se em um controle com BELBIC, de forma a alcançar uma forma inteligente de rastreamento da posição de forma adaptável online. O trabalho de (JAFARI et al., 2013) associou um controlador BELBIC com o controlador do tipo proporcional-integral (PI), aplicado-os a um dispositivo de controle de fluxo de potência, tendo como objetivo melhorar a estabilidade transitória. Em (LUCAS; RASHIDI; ABDI, 2004), utilizou-se com sucesso um controlador do tipo BELBIC para tomar decisões e controlar processo lineares. No caso dos sistemas não-lineares, aplicou-se este controle para um sistema de controle do motor síncrono magnético e um regulador de tensão automático com sucesso (LUCAS; RASHIDI; ABDI, 2004; RAHMAN et al., 2008a). Em (JAMALI et al., 2008), o BELBIC foi utilizado para controle do posicionamento e deslocamento de um guindaste. Essas e outras aplicações têm demonstrado, cada vez mais, a eficácia deste tipo de controlador em diversas áreas nos mais variados tipos de sistemas de controle.

Em (MONGKOLTANATAS, 2014) é analisada a estabilidade de frequência de microrredes de até 1 MW operando em modo isolado, a qual a inercia equivalente é baixa. O estudo traz o impacto da variação de potência ativa da carga, sobre os geradores de

microrredes operando em modo isolado, em especial, nas que possuem fontes de energia renovável por apresentarem altos riscos de instabilidade de frequência. As soluções apresentadas pelo autor consistem definir uma metodologia para dimensionar a estratégia adequada de SAE em microrredes isoladas com uma elevada taxa de inserção de energia fotovoltaica.

Segundo (BAHRAMIPANAH et al., 2016) constata que devido à crescente inserção de GD nos sistemas de distribuição e a maior parte das fontes renováveis de GD apenas fornecem energia intermitente, o controle e a operação de sistemas elétricos de potência passam atualmente por mudanças consideráveis. Ela propõe, para garantir uma rede mais estável, a utilização de SAE, por permitir o controle do fluxo de potência ativa na rede, o controle indireto dos perfis de tensão ao longo dos alimentadores e o balanço local de variações de carga.

No artigo (LU; LIU; WU, 1995), os autores apontam que, por ter uma ação rápida de armazenamento de energia, o BESS pode auxiliar o controle de frequência frente as variações de carga. O autor propõem a implementação de um modelo incremental de BESS, adequado para os modos de operação de carga e descarga, ao controle de frequência de um sistema de potência de grande porte. Os resultados do modelo comprovaram a capacidade para amortecer as oscilações causadas por distúrbios de carga, fornecendo uma melhora significativa no desempenho do sistema.

Uma característica relevante das baterias é a rápida resposta. Porém, possuem uma limitação de energia fornecida, ou seja, não suportam prestar serviços por longos períodos de tempo. Assim, os autores em (MÉGEL; MATHIEU; ANDERSSON, 2013) exploram métodos para melhorar a capacidade das baterias em fornecer controle de frequência primário e secundário. O objetivo é alterar a resposta de controle de frequência de um sistema de baterias, para que responda a desvios de frequência rápido, enquanto variações mais lentas devem ser supridas por outros recursos, mantendo o estado de carga das baterias (SoC, do inglês, *State of Charge*) na faixa aceitável. Para tornar isto possível, propõe-se estratégias de controle de frequência baseado na sobreposição de um sinal de *offset* incrementado na realimentação do sinal de frequência enviado à bateria.

Revedo as estratégias de controle utilizadas em MRs, mostra-se que a maioria dos métodos requerem informações detalhadas sobre a dinâmica do sistema. Nesse sentido, é proposto um modelo adaptativo de controlador que possua a liberdade de aplicação aos sistemas não-lineares e de natureza dinâmica complexa, como o caso das RED em microrredes.

1.2 Objetivos

O objetivo geral dessa tese é projetar um controlador inteligente baseado no processo de aprendizagem emocional do cérebro (BELBIC), que seja capaz de controlar o desvio de frequência em microrredes injetando ou absorvendo potência ativa utilizando o BESS.

São objetivos específicos dessa pesquisa:

- Apresentar uma revisão bibliográfica a respeito do conceito de microrredes; normas técnicas, padrões e requisitos de conexão; além dos modos de operação e controle hierárquico na aplicação de sistemas de armazenamento de energia em baterias com o intuito do controle da frequência;
- Definir, dentre os modelos elétricos estudados dos RED associados aos conversores eletrônicos, o modelo mais adequado para utilizar neste estudo e validar a operação dos controles primário e secundário dentro dos modelos;
- Compreender o sistema límbico para entendimento da modelagem matemática do controlador emocional (BELBIC) e posteriormente aplicar a técnica de otimização por enxame de partículas (PSO, do inglês *Particle Swarm Optimization*) para otimizar os parâmetros dos controlador;
- Modelar a MR e os RED que as compõe, através de modelos pré-existentes na literatura, para obter um modelo teste a ser utilizado no ambiente de simulação *Matlab/Simulink*;
- Simular os cenários no modo ilhado e analisar a resposta dinâmica da MR, verificando o comportamento dinâmico das grandezas elétricas da MR e dos RED, visto que identifique-se os comportamentos que poderiam comprometer a continuidade operativa dos RED e de toda a MR;
- Comparar o desempenho dinâmico da MR no modo ilhado em caso de ocorrência do desbalanço entre carga e geração.

1.3 Contribuições

De forma geral, a contribuição deste trabalho é a implementação computacional e análise de desempenho da estratégia de controle de frequência aplicada a microrrede operando no modo ilhado. A implementação seria capacidade de realizar a transição do modo conectado com a rede para o modo ilhado, porém, o trabalho tem como foco analisar os resultados no modo ilhado. Ademais, propor uma estratégia para controlar a frequência, na presença de algum evento que cause desequilíbrio de geração e carga, utilizando um sistema de armazenamento de energia por baterias para dar suporte a esse evento.

O conhecimento dos benefícios esperados da implementação de SAE em sistemas elétricos não é só por si suficiente. Advém a importância de estudar os mecanismos de controle que deverão ser desenvolvidos para que os mesmos cumpram as funções requeridas de forma adequada. O BESS responde rapidamente ao evento que causa desequilíbrio de demanda e geração e auxilia no amortecimento do desvio de frequência. Embora apresente resposta rápida, os sistemas de armazenamento possuem potência e energia limitadas. Além disso, ligar e desligar esses sistemas consecutivas vezes pode comprometer a sua vida útil. Outro possível problema é no caso no qual a bateria pode estar descarregada, em decorrência de uma situação crítica

onde foi acionada por um longo tempo para amortecer pequenos desvios, a fim de restabelecer a frequência da microrrede.

Por fim, este trabalho propõe utilizar o controlador BELBIC em um BESS a fim de restabelecer a frequência da MR, porém limitando o acionamento deste sistema apenas a partir de um valor de desvio de frequência. Além de disponibilizar uma alternativa de ajuste dos parâmetros do controlador BELBIC baseado na técnica de otimização PSO que será responsável na busca de um valor ótimo dos parâmetros, considerando que os próprios autores do controlador BELBIC não definem um método para tal aplicação.

1.4 Organização textual

De forma a demonstrar a metodologia desenvolvida, a tese é estruturada em sete capítulos. Após a parte introdutória, o trabalho apresenta a seguinte estrutura organizacional:

- **Capítulo 2-** É realizada uma revisão bibliográfica sobre as microrredes, em detalhes, traz os seguintes tópicos: conceitos, normas e padrões de conexões, modos de operação e controle hierárquico.
- **Capítulo 3-** É apresentada uma revisão sobre os modelos elétricos dos RED associados aos conversores eletrônicos, sistemas de controle e fontes primárias. Além de descrever os modelos utilizados para modelar os RED do sistema de armazenamento em baterias e sistema fotovoltaico.
- **Capítulo 4-** Tem como objetivo introduzir os conceitos do sistema límbico e sua modelagem computacional. Como o objetivo da tese é uma aplicação em sistemas de controle, não serão abordadas todas partes desse sistema, e sim apenas as estruturas responsáveis por representar o modelo proposto. Ao final do capítulo, é abordado o conceito do PSO, definindo os principais pontos do algoritmo.
- **Capítulo 5-** Expõe os modelos desenvolvidos para realizar as simulações no modo ilhado da MR nos cenários propostos. Descrevendo-se a topologia e os demais elementos que à compõe. Além disso serão definidos os principais parâmetros nominais da MR e dos RED, a estrutura dos controles: *droop* como controle primário, e os controladores propostos PI e BELBIC como controles primários e secundários.
- **Capítulo 6-** Descreve os cenários propostos e pontos de operação, em seguida apresenta os resultados na condição de ilhamento com a variação de carga ou a diminuição da geração fotovoltaica. Assim, para os cenários construídos o objetivo é avaliar a utilização de sistemas de armazenamento de energia em baterias para dar suporte no controle de frequência em MR injetando ou absorvendo potência.

- **Capítulo 7-** Apresenta as conclusões da tese e as respectivas etapas futuras correlacionados ao trabalho proposto.

2 MICRORREDES

Neste capítulo, inicialmente será apresentando o conceito de microrrede, considerando as principais definições e características acerca da utilização delas. Posteriormente será apresentado um levantamento do estado da arte referente a normas e padrões de conexão de microrredes ao sistema elétrico de distribuição, apontando os principais requisitos de acesso e conexão à rede, bem como recomendações descritas em normas nacionais e internacionais.

Serão avaliados os requisitos de conexão descritos nos Procedimentos de Rede do ONS (Operador Nacional do Sistema), do mesmo modo descritos nos documentos do Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST). Embora essa tese não tenham como objetivo apresentar normas e padrões específicos para microrredes, entende-se que algumas tecnologias, que no futuro estarão conectadas de forma distribuída (ou mesmo junto ao consumidor - *behind-the-meter*), já estão presentes na operação dos sistemas de potência. Portanto, entende-se, resguardadas as proporções e as especificidades de cada tecnologia, alguns requisitos, principalmente aqueles associados à conexão de fontes de geração, poderão ser exigidos para microrredes nos seus pontos de acoplamento.

No aspecto de normas internacionais, algumas normas do IEEE (*Institute of Electrical and Eletronics Engineers*) e da IEC (*International Eletrotecnical Comission*) também serão avaliadas. Essas normas apresentam especificações exclusivamente para microrredes e elementos que podem ser considerados geração distribuída, portanto, elas podem ser usadas como base para uma possível elaboração de proposta para uma norma nacional específica para microrredes.

Na Seção 2.8, serão apresentadas as principais características e modos de operação de uma MR. Os dois principais modos de operação de MR são abordados, modo conectado e ilhado - descritos também sucintamente a transição. O modo ilhado é destacado por fazer parte do escopo do trabalho, sendo assim apresentados os principais métodos para o gerenciamento de uma MR nesse modo de operação.

Ao final do capítulo, o controle de MR é discutido na Seção 2.10, através da abordagem de controle hierárquica. No tema controle hierárquico, a proposta de um controle primário e secundário acoplado é o nível de controle a ser utilizado neste trabalho, portanto, na seção serão apresentadas as definições das três abordagens hierárquicas de controle, com breves explanações dos níveis dos controles primário, secundário e terciário.

2.1 Introdução

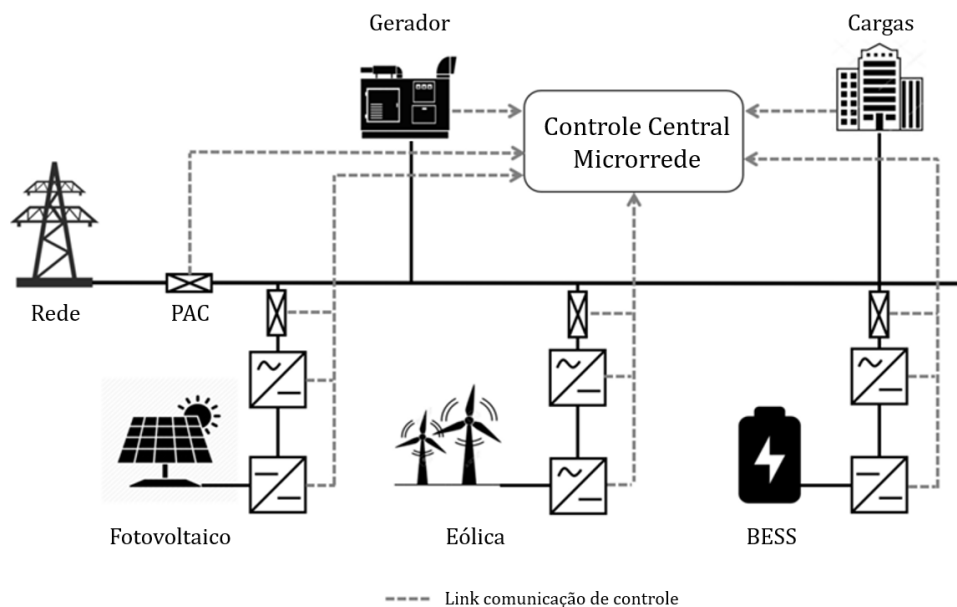
O aumento da inserção de GD interconectada com a rede de distribuição, bem como sua evolução em termos tecnológicos, tem possibilitado o arranjo de MR de energia elétrica (HATZIARGYRIOU et al., 2007). Frente a isso, incentivos à geração GD tomam proporções

relevantes e cada vez encontram-se mais próximos dos consumidores. A alternativa possibilita a mudança da característica do fluxo de potência no sistema elétrico e questões técnicas, políticos ambientais e econômicas que são os argumentos mais plausíveis para as mudanças que surgem no setor elétrico.

As Microrredes inteligentes podem ser consideradas pequenas e modernos sistemas que se assemelham, em menor escala, aos grandes sistemas elétricos centralizados atuais. De forma similar aos sistemas elétricos de potência de grande porte, as microrredes podem gerar, distribuir e regular o fluxo de eletricidade aos consumidores, conectando-se entre si quanto e a rede principal para aumento da capacidade, confiabilidade e eficiência (ALCÂNTARA, 2011).

A Figura 2 apresenta a estrutura típica de uma microrrede genérica que usualmente são estruturadas com recursos de geração e sistemas de armazenamento alocados de forma descentralizada, com a conexão próxima à carga elétrica atrás do ponto de acoplamento comum (PAC) em inglês PCC (*Point of Common Coupling*). Nesse sentido, pode-se dizer que as microrredes são dotadas de Recursos Energéticos Distribuídos (DER, do inglês (*Distributed Energy Resources*)) e a implantação em larga escala das tecnologias de microrredes depende também do desenvolvimento e aplicação da infraestrutura de integração dos recursos distribuídos.

Figura 2 – Visão geral de uma Microrrede.



Fonte: Próprio autor.

A norma que rege os requisitos técnicos para interconexão de RED (de até 10 MVA ao ponto de acoplamento comum) à rede de distribuição é a norma IEEE 1547 “*IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems*” (PHOTOVOLTAICS; STORAGE, 2009).

Os RED são definidos como tecnologias de geração e/ou armazenamento de energia

elétrica, localizados na área delimitada da concessionária de distribuição, normalmente próximas as unidades consumidoras, atrás do medidor (*behind-the-meter*)(EPE, 2018). Em alguns situações, ações de eficiência energética, estratégias de gerenciamento pelo lado da demanda (GLD) e veículos elétricos também podem ser considerados recursos energéticos distribuídos (SILVA, 2016).

Atualmente, tem-se observado uma crescente inserção dos RED, atrelada principalmente a redução nos custos de investimentos e transação, pela maior disseminação das tecnologias de telecomunicação e controle, e consumidores mais ativos. O recente crescimento aponta que a difusão destas tecnologias apresentam um grande potencial disruptivo, capaz de ocasionar transformações profundamente nos sistemas elétricos que hoje são predominantemente operados com recursos de grande porte e gerenciamento centralizados. De acordo com *World Energy Council* (WEC-2017), no horizonte entre 2017 e 2025 observa-se em diversos países a transição de sistemas elétricos predominantemente centralizados para sistemas híbridos - considerando o início do processo de implantação de microrredes (OLIVER, 2020).

Ainda em relação as Microrredes, as infraestruturas de RED permitem a maior participação do consumidor tanto na geração, quanto na gestão do consumo da sua própria energia. Portanto, os recursos distribuídos para compor uma microrrede contemplam: fontes de geração distribuída, tecnologias de armazenamento de energia, veículos elétricos (EV – *Electrical Vehicles*) e seus sistemas de recarga. Estes recursos apresentam características específicas de operação e, em função da possibilidade de ocorrência de impactos na rede de distribuição, devem apresentar requisitos diferenciados de conexão à rede de distribuição.

Ao se tratar de GD, algumas tecnologias de geração aplicáveis em microrredes como: sistemas de geração fotovoltaica, sistemas de geração eólica ou micro-eólica, turbinas termoelétricas (biomassa, a gás, diesel, entre outras fontes primárias de energia), plantas de cogeração e cogeração qualificada e pequenas centrais hidrelétricas (PCH). A Tabela 1 apresenta algumas características de microgeradores em relação à conexão às redes de distribuição em geral.

Impulsionado pelo crescente uso de microfontes de geração distribuída e sistemas de armazenamento, as microrredes vem apresentando grandes expectativas de expansão mundial, tornando-se assim mais favorável o desenvolvimento de novas normas regulamentadoras para o setor de energia elétrica (BHASKARA; CHOWDHURY, 2012). A operação e o controle delas com GD, proveniente de fontes renováveis, podendo ser um desafio diante da variabilidade e intermitência; e com isso tornando difícil manter os requisitos usuais de frequência e ao mesmo tempo acomodar as flutuações de carga, principalmente em modos de operação de forma isolada. Nesse sentido, os SAE desempenham um papel fundamental, principalmente se houver a possibilidade de paralelismo contínuo e desconexão automática da rede elétrica (em modo de operação ilhada). Em consequência da capacidade de operar como carga ou gerador, carregando ou descarregando, a aplicação de SAE pode mitigar o impacto das variações da GD renovável e

Tabela 1 – Características de Microgeradores quanto à conexão às microrredes.

MICROGERAÇÃO		HABILIDADE DE OPERAR COMO UMA FONTE ISOLADA	SINCRONISMO COM A REDE DE DISTRIBUIÇÃO	CONTRIBUIÇÕES ÀS FALTAS	INJEÇÃO DE POTÊNCIA REATIVA E CAPACIDADE DE CONTROLE	VELOCIDADE DE RESPOSTA A MUDANÇAS DE CARGA E NECESSIDADE DE REATIVOS	ANTI ILHA-MENTO ATIVO
MICROTURBINAS / MICROTURBINA EÓLICA	GERADOR SÍN-CRONO	EXCITATRIZ PERMITE OPERAR DE FORMA ILHADA	PODE OPERAR COMO UMA FONTE SÍNCRONA	PICO DE CORRENTE DE QUATRO A OITO VEZES POR ALGUNS CICLOS	SIM – ATRAVÉS DO AJUSTE DA EXCITAÇÃO PODE REGULAR A POTÊNCIA REATIVA	REQUER CERTO TEMPO PARA RESPONDER	NÃO
MICROTURBINA EÓLICA	GERADOR DE INDUÇÃO	NORMALMENTE NÃO ATUA ILHADO, MAS PODE SE AUTOEXCITAR ACIDENTALMENTE SE ISOLADO COM UM CAPACITOR	TIPICAMENTE OPERADO COM ALTO PERCENTUAL DE ESCORREGAMENTO	PICO DE CORRENTE DE 4 A 8 VEZES POR ALGUNS CICLOS	SEM CONTROLE DE POTÊNCIA REATIVA	NÃO POSSUI CONTROLE DE EXCITAÇÃO	NÃO
MICROTURBINA EÓLICA/FOVOLTÁICA/CÉLULA A COMBUSTÍVEL/ MICROTURBINAS	INVERSOR AC/ DC/ AC	INVERSOR COM FONTE DE TENSÃO AUTO-COMUTADA PODE FUNCIONAR ILHADO	DEVE FUNCIONAR COMO UMA FONTE DE SINCRONISMO	NORMALMENTE, MENOS DE DUAS VEZES A CORRENTE NOMINAL E DE MUITO CURTA DURAÇÃO	ALGUNS INVERSORES PODEM VARIAR A SAÍDA DE POTÊNCIA REATIVA E OFERECER SUPORTE REATIVO, DEVE FUNCIONAR PRÓXIMO DO FATOR DE POTÊNCIA UNITÁRIO	O INVERSOR PODE RESPONDER QUASE QUE INSTANTANEAMENTE PARA DETECTAR CONDIÇÕES DE CONTROLE DE POTÊNCIA ATIVA E REATIVA SE DEVIDAMENTE PROJETADO E CONECTADO A UM ARMAZENADOR DE ENERGIA	SIM

Fonte: Adaptado de (ALCÂNTARA, 2011).

da carga, garantindo a estabilidade e confiabilidade da Microrrede (GAO, 2015).

2.2 O conceito de Microrrede

Uma definição bastante difundida para MR de energia elétrica é aquela que a considera como um agrupamento de cargas e dispositivos de microgeração que, do ponto de vista da rede de distribuição, opera como um sistema único em uma área geograficamente definida, podendo ser tratada como uma única carga controlada. Em termos gerais, afirma-se como um agrupamento que atua de maneira semelhante ao sistema de potência em tamanho reduzido, possuindo requisitos específicos à sua operação, em que a confiabilidade, qualidade de fornecimento e disponibilidade devem ser analisados através do controle centralizado, e que embora estejam conectadas a rede elétrica principal (em um único ponto), eventualmente pode operar isolada. (LASSETER, 2001; VECHIU et al., 2011; BEVRANI; WATANABE; MITANI, 2014).

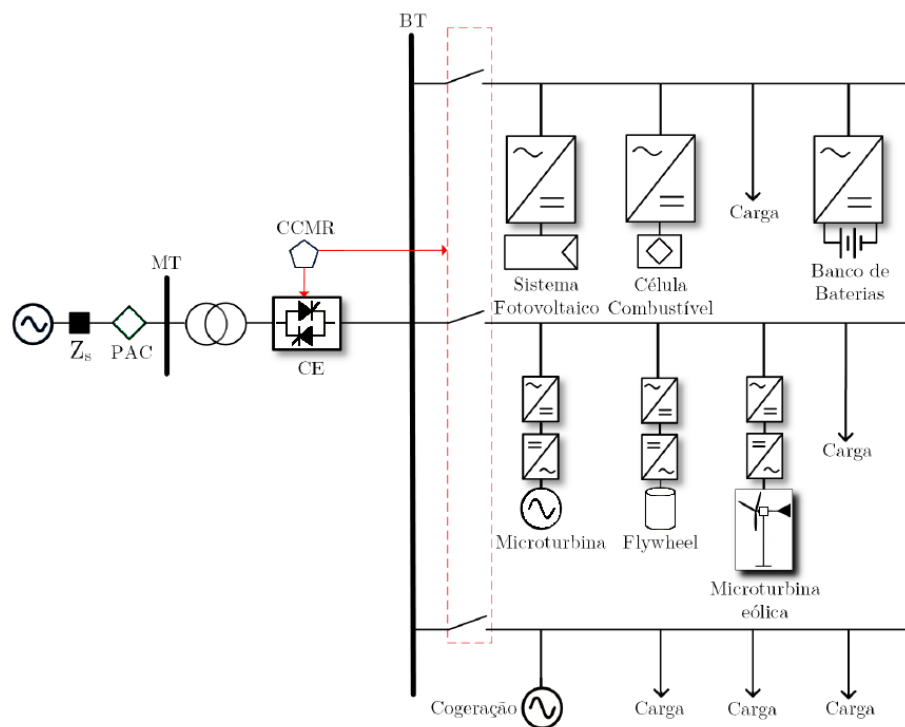
Como mencionado na seção anterior, para que a integração dos RED ocorra de forma satisfatória, alguns desafios técnicos devem ser solucionados, incluindo: programação e despacho das unidades de geração, controle da demanda, operação econômica da MR, ajustes nas proteção e alterações na rede de distribuição que permitam o fluxo bidirecional de energia (OLIVARES et al., 2014).

Diante dos desafios envolvidos no gerenciamento dos dispositivos de microgeração há uma certa motivação no desenvolvimento de novos métodos e técnicas para contornar os problemas encontrados. Tradicionalmente, toda a parte do controle do fornecimento de energia

elétrica aos usuários é sob responsabilidade das distribuidoras, porém com a implantação de MR as responsabilidades podem ser compartilhadas. Para isso, as MRs precisam conter um *Energy Management System* (EMS), cuja função, dentre outras, é realizar o gerenciamento energético da MR e a integração ao SEP. Este gerenciamento também deverá levar em consideração os eventuais modos de operação de ilhamento e conexão (PIAGI; LASSETER, 2006; HATZIARGYRIOU et al., 2007).

Considerando as possíveis configurações das MRs, a depender da quantidade e tipo de cargas, RED e SAE; a Figura 3 ilustra a arquitetura básica de uma microrrede em corrente alternada. Como ilustrado, conectados à rede elétrica principal existe três alimentadores radiais no lado de baixa tensão. Para a rede, há o ponto de acoplamento comum, representado na figura do lado de média tensão e de baixa tensão.

Figura 3 – Típica configuração de uma MR.



Fonte: Adaptado de (EID et al., 2014)

No centro de controle da microrrede, aqui chamado de CCMR (Central de Controle da Microrrede), é responsável por coordenar globalmente as microfontes de GD, os sistemas de armazenamento de energia e as cargas elétricas (BEVRANI; WATANABE; MITANI, 2014; KAUR; KAUSHAL; BASAK, 2016). Além de definir as potências ativa e reativa de despacho; controle de tensão e frequência no PAC em baixa tensão (EID et al., 2014). Vale salientar que uma unidade não despachável não pode ser controlada pelo CCMR, visto que a sua fonte de energia primária não é controlável (geração fotovoltaica e eólica) devido a sua intermitência e volatilidade na produção de energia. A intermitência indicando a indisponibilidade de geração

em determinadas situações e a volatilidade a flutuação da energia produzida ao longo do tempo. No caso das fontes despacháveis há controle pelo CCMR, pois a fonte de energia há uma disponibilidade na sua geração.

A chave estática, apresentada na Figura 3, é o elemento fundamental da interligação com à rede elétrica e permite a alternância da microrrede nos dois modos de operação, conectada à rede ou ilhado, haja interrupção ou não da energia elétrica para as cargas elétricas (KAMEL; KERMANSHAHI, 2010; PAQUETTE; DIVAN, 2014; POPOV et al., 2009). A CE com tiristores apresentam um tempo de abertura/fechamento inferior a um ciclo da componente fundamental de tensão da rede, que irão garantir uma rápida transferência (AMARAL et al., 2015; KROPOSKI et al., 2008). Entretanto, as chaves mecânicas tipo contatores ou disjuntores levam entre dois a três ciclos da fundamental para garantir a abertura ou fechamento do circuito, não podendo ser substituídas por CEs (CHUNG et al., 2008).

2.3 Padrões e requisitos gerais de conexão

Esta seção explora brevemente uma visão geral dos requisitos técnicos mínimos para o acesso às redes elétricas de transmissão e de distribuição. Embora o foco da tese não seja voltado para nível de tensão de transmissão (tensão igual ou superior a 230 kV). Ao considerar este nível de tensão, os requisitos de acesso são regidos pelo ONS por meio dos Procedimentos de Rede (ONS, 2019). Quando se trata do caso da conexão em redes em nível tensão de distribuição, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) regulamentou os requisitos mínimos de referência por meio do PRODIST (ANEEL, 2018).

Ao considerar os dois casos citados, entende-se que o PRODIST possui maior correlação com as características específicas das Microrredes, mas não eliminando a possibilidade de consulta aos Procedimentos de Rede, uma vez que a Microrrede deve incorporar os modos de operação da rede centralizada.

Não é objetivo deste trabalho explorar todos os Procedimentos de Rede do ONS, porém serão explorados sucintamente os requisitos de conexão conforme o PRODIST.

2.3.1 Critérios técnicos e operacionais conforme o PRODIST

A Resolução Normativa ANEEL nº 956/2021, estabelece os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional, cujo procedimento é composto por treze módulos. O foco da seção será tratar do Módulo 3 - Conexão ao Sistema de Distribuição de Energia Elétrica.

O objetivo do módulo é estabelecer as condições de acesso - compreendendo a conexão e o uso - ao sistema de distribuição; definir os critérios técnicos e operacionais, os requisitos de projeto, as informações, os dados e a implementação da conexão.

De acordo com a definição do PRODIST, a Microrrede é um tipo de rede de distribuição de energia elétrica que possibilita a operação isolada do sistema de distribuição, e atendida diretamente por uma unidade de GD. Adicionalmente, o documento traz outra definição, como sendo o conjunto de centrais de GD localizadas em uma mesma área e conectadas a uma mesma distribuidora, despachadas por um mesmo centro de despacho de GD (ALCÂNTARA, 2011).

Ao solicitar o ponto de conexão da MR ao sistema de distribuição, deve ser levado em consideração todos os componentes do sistema de conexão padrão de uma rede convencional, como por exemplo: medição, subsistemas de proteção, entre outros.

2.3.2 Requisitos gerais para conexão de consumidores ou cargas

Os requisitos são bem estabelecidos quando se interpreta uma MR como uma carga no sistema de distribuição - neste caso em corrente alternada e frequência de 60 Hz. Outros pontos relevantes terão que ser cuidadosamente analisados para não ocorrer problemas técnicos e de segurança aos acessantes da rede de distribuição (a própria distribuidora ou a equipe envolvida em O&M), estes garantindo uma recomposição segura do sistema de distribuição e cuidados no paralelismo.

A responsabilidade de garantir o sincronismo/conexão da MR é do operador. O ajuste das proteções para casos de desligamento deve ser sincronizado para que não ocorra um paralelismo com a distribuidora anteriormente a tentativa de reconexão. A garantia da desconexão física possibilita a MR operar de modo ilhado com base no descrito no Módulo 3 (ANEEL, 2018).

A MR conectada ao sistema de distribuição deve operar dentro dos limites de frequência estabelecidos pelo PRODIST (ANEEL, 2018). As faixas de operação da frequência serão apresentadas posteriormente em ocorrência de distúrbios no sistema de distribuição que garantem o equilíbrio carga-geração em tempos pré-definidos.

Outros pontos citados no PRODIST, trata-se dos projetos das instalações de conexão, estes devem obedecer os critérios do nível de tensão da conexão da microrrede assim como a quantidade de fases que deverão ser definidas pela distribuidora em conformidade com as características técnicas da MR e com a regulamentação vigente. Para atender os requisitos mínimos para o ponto de conexão da MR o PRODIST apresenta uma Tabela 2 com essas regras.

Notas:

- (a) Chave seccionadora visível e acessível que a acessada usa para garantir a desconexão da central geradora durante manutenção em seu sistema, exceto para microgeradores e minigeradores que se conectam à rede através de inversores.
- (b) Elemento de interrupção automático acionado por proteção para microgeradores distribuídos e por comando e/ou proteção para minigeradores distribuídos.
- (c) Transformador de interface entre a unidade consumidora e rede de distribuição.
- (d) Não é necessário relé de proteção específico, mas um sistema eletroeletrônico que detecte tais anomalias e que produza uma saída capaz de operar na lógica de atuação do elemento de interrupção.

Tabela 2 – Requisitos mínimos em função da potência instalada.

Equipamento	Potência instalada $\leq$ a 75kW	Pot. inst. $\geq$ 75kW Pot. inst. $\leq$ 500kW	Pot. inst. $\geq$ 500kW Pot. inst. $\leq$ 1MW
Elemento de desconexão ^(a)	Sim	Sim	Sim
Elemento de interrupção ^(b)	Sim	Sim	Sim
Transformador de acoplamento ^(c)	Não	Sim	Sim
Proteção de sub e sobretensão	Sim ^(d)	Sim ^(d)	Sim
Proteção de sub e sobrefrequência	Sim ^(d)	Sim ^(d)	Sim
Proteção contra desequilíbrio de corrente	Não	Não	Sim
Proteção contra desbalanço de tensão	Não	Não	Sim
Sobrecorrente direcional	Não	Sim	Sim
Sobrecorrente com restrição de tensão	Não	Não	Sim
Relé de sincronismo	Sim ^(e)	Sim ^(e)	Sim
Anti-ilhamento	Sim ^(f)	Sim ^(f)	Sim ^(f)
Medição	Sistema de Medição Bidirecional ^(g)	Medidor 4 Quadrantes	Medidor 4 Quadrantes

Fonte: Adaptado da (ANEEL, 2018).

(e) Não é necessário relé de sincronismo específico, mas um sistema eletroeletrônico que realize o sincronismo com a frequência da rede e que produza uma saída capaz de operar na lógica de atuação do elemento de interrupção, de maneira que somente ocorra a conexão com a rede após o sincronismo ter sido atingido.

(f) No caso de operação em ilha do acessante, a proteção de anti-ilhamento deve garantir a desconexão física entre a rede de distribuição e as instalações elétricas internas à unidade consumidora, incluindo a parcela de carga e de geração, sendo vedada a conexão ao sistema da distribuidora durante a interrupção do fornecimento.

(g) O sistema de medição bidirecional deve, no mínimo, diferenciar a energia elétrica ativa consumida da energia elétrica ativa injetada na rede.

Além do Módulo 3, aqui apresentado de forma sucinta, porém não deixando de explorar os principais pontos relacionados à análise sobre MR; o Módulo 8 também é um ponto a ser estudado quando se trata das questões relativas a Qualidade da Energia Elétrica, entretanto não será descrito por não ser o objetivo principal da tese. De forma breve, os valores de referência que devem ser adotados para os indicadores de tensão em regime permanente, fator de potência, distorção harmônica, desequilíbrio de tensão, flutuação de tensão e variação de frequência são os

estabelecidos pelos critérios descritos neste módulo.

Por fim, em situações onde o sistema de medição da MR tenha que atender às mesmas especificações exigidas para as unidades consumidoras convencionais com GD, entende-se que deverá, no mínimo, conter a funcionalidade de medição bidirecional de energia elétrica ativa para mensurar a potência gerada e absorvida.

Na próxima seção será apresentado um levantamento de normas técnicas internacionais associadas a microrredes e as famílias de normas IEEE e IEC que se aplicam às nanorredes, visto que é admissível considerar que uma nanorrede é um tipo específico de MR com potência/escala reduzida. Essas normas geralmente são usadas como base para elaboração da futura norma nacional específica para microrredes.

2.4 Normas e padrões internacionais relativos aos padrões e requisitos de conexão de Microrredes

As normas e padrões, de modo geral, são elaboradoras com suas particularidades referentes a cada concessionárias locais de energia, que geralmente consideram as diretrizes e os padrões recomendados pelo IEEE e IEC.

De forma sucinta, as Tabelas 3 e 4 apresentam as normas e os critérios de conexão e operação de GD, sistemas de armazenamento e os respectivos controles adequados para a conexão de MR no sistema de distribuição, que necessitam atender aos requisitos mínimos em relação aos níveis de tensão, de frequência, qualidade de energia, operação conectada à rede e ilhada, e entre outros.

Com relação a integração de veículos elétricos (VE) em microrredes e redes convencionais, ainda são poucas as informações disponibilizadas em normas, considerando que trata-se de um tema relativamente recente. A norma IEC (IEC-61851, 2017) discute os modos de carregamento do veículo elétrico e, no Brasil, uma resolução normativa da ANEEL que estabelece alguns procedimentos e condições para a realização de atividades de recarga de VE por concessionárias e permissionárias de serviço público e/ou privado de distribuição de energia elétrica (ANEEL-Nº819, 2018). Embora não há uma associação direta com as normas no contexto de microrredes, estas podem ser utilizadas referenciadas em possíveis propostas de normas específicas de VE em uma microrrede.

2.5 Normas e padrões internacionais relativos aos padrões e requisitos de conexão de Nanorredes

Ao se tratar de tema relativamente novo, em particular no Brasil, não se tem normas técnicas específicas para a operação de Nanorredes. Entretanto, na possibilidade de operação conectada ao sistema de distribuição, no ponto de acoplamento, devem ser observados os

Tabela 3 – Normas e padrões recomendados IEEE.

IEEE	Std 1547-2018	<i>Standard for Interconnecting Distributed Resources With Electrical Power Systems</i>	Há dois tipos de topologia de microrredes: as que aceitam fluxo bidirecional e as com fluxo unidirecional. As subseções da norma são: Conexão e Reconexão com a rede, Critérios e Requisitos de Operação, Potência Ativa – Requisitos Essenciais e Regulação de Potência Ativa, Potência Reativa – Fontes de Potências Reativa, Regulação de Tensão, Qualidade de Energia, Segurança e Proteção e Operação Ilhada.
IEEE	Std 2030.7	<i>Standard for the Specification of Microgrids Controllers</i>	Módulos especificam técnicas e requisitos para controladores de microrredes.
IEEE	Std 2030.8	<i>Standard for the Testing of Microgrid Controllers</i>	Módulos especificam técnicas e requisitos para controladores de microrredes.
IEEE	Std 2030.9	<i>Recommended Practice for the Planning and design of Microgrid</i>	Especifica práticas e recomendadas do planejamento e projeto de MR, fornecendo, também, requisitos técnicos e especificações. Intuito de garantir a segurança, confiabilidade e sustentabilidade das MR. Ressalta-se que o fato dessa Norma fazer a especificação dos níveis de tensão com que a MR, dependendo da capacidade de GD instalada na mesma. Além dos níveis de tensão do sistema elétrico na qual a MR será conectada e os limites de intercâmbio de potência no PAC.

Fonte: IEEE.

requisitos operativos estabelecidos no PRODIST (seção 2.3). No ponto de conexão, a Nanorrede deve atender os limites operativos associados a cargas e à geração distribuída convencional.

2.5.1 Normas internacionais de organismos normativos

A operação das Nanorredes podem impor desafios operativos, uma vez que a presença de RED associados a cargas e sistemas de armazenamento é uma condição nova nos sistemas de distribuição energia.

Ao avaliar estes documentos, percebeu-se que geralmente os estados americanos utilizam as diretrizes do padrão IEEE 1547, enquanto os países Europeus adotam a IEC 62898 para nortear os requisitos de operação. Porém, os limites impostos no PRODIST (Módulo 8) diferem

Tabela 4 – Normas e padrões recomendados IEC.

IEC	TS 62898-1	<i>Technical Specification Part 1: Guidelines for Microgrid Projects Planning and Specification</i>	Basicamente trata dos seguintes aspectos: estudo preliminar do planejamento de MR, análises dos tipos de fontes de geração de energia, predição de carregamento, planejamento da geração distribuída, e planejamento do sistema de potência; princípios técnicos e requisitos especificados durante o estágio de planejamento de uma MR e avaliação da MR para escolha de um esquema ótimo.
IEC	TS 62898-2	<i>Technical Specification Part 2: Guidelines for Operation</i>	Em linhas gerais, de aspectos como: requisitos de operação e controle das microrredes em diferentes modos de operação; estratégias básicas de controle e métodos sob diferentes modos de operação; requisitos de sistemas de armazenamento, monitoramento e comunicação em diferentes modos de operação e qualidade de Energia.

Fonte: IEC.

do IEEE, como mostrado na Tabela 5. Embora as normas internacionais sejam utilizadas como fonte de embasamento teórico e de diretrizes, no Brasil, exceto quando houver lacuna normativa, os limites devem respeitar os estabelecidos no PRODIST e normas brasileiras vigentes.

Tabela 5 – Limites de Frequência - Comparação (PRODIST x IEEE x IEC).

Norma	Limites de Frequência em Operação Normal em Regime Permanente (Hz)	Faixa de Variação
PRODIST	$59,9 < f \leq 60,1$	$\pm 0,1$ Hz
IEEE 1547	$58,8 < f \leq 61,2$	$\pm 1,2$ Hz
IEC	-	-

Fonte: ONS, IEEE e IEC.

Ao analisar as condições de operação e limites de frequência adotados pelo PRODIST, as Tabelas 6 e 7 evidenciam os respectivos valores adotados de referência. Enquanto os requisitos de manutenção da frequência de acordo com a IEEE 1547 estão evidenciados na Tabela 8.

Ainda em relação as normas internacionais – durante as pesquisas realizadas – foram visto as tendências em normatização/padronização para infraestrutura de energia da IEC que inclui microrrede, *smart grids* e corrente contínua (IEC-STANDARDIZATION, 2014). Em 1995, claramente houve uma importância da padronização internacional, com a introdução do acordo

Tabela 6 – PRODIST: Condições de Operação - Limites de Frequência.

Faixa de Frequência (Hz)	Modo de Operação	Tempo de Operação (s)
$59,9 < f \leq 60,1$	Condições normais de operação e em regime permanente.	∞
$59,5 < f \leq 60,5$	Na ocorrência de distúrbios no sistema de distribuição, as instalações de geração devem garantir que a frequência retome para a faixa de frequência, permitindo a recuperação do equilíbrio carga-geração.	30

Fonte: ONS.

Tabela 7 – PRODIST: Condições de Operação - Limites de Frequência (com corte de carga ou de geração).

Faixa de Frequência (Hz)	Modo de Operação	Tempo de Operação (s)
$f < 56,5$ $f > 66$	Limite de frequência não permitido ultrapassagem mesmo em condições extremas.	-
$f < 58,5$ $f > 63,5$	Pode permanecer.	10
$f > 62$		30
$f < 57,5$		5

Fonte: ONS.

Tabela 8 – IEEE 1547: Requisitos de manutenção de frequência para RED.

Faixa de Frequência (Hz)	Modo de Operação	Tempo Mínimo (s) (critério de projeto)
$f > 62$	A desconexão é permitida para esta faixa de frequência.	-
$61,2 < f \leq 61,8$	Operação Obrigatória.	299
$58,8 \leq f \leq 61,2$	Operação Contínua.	∞
$57,0 \leq f < 58,8$	Operação Obrigatória.	299
$f < 57,0$	A desconexão é permitida para esta faixa de frequência.	-

Fonte: IEEE.

da *World Trade Organization/Technical Barriers to Trade* (WTO/TBT) e em 1996 da *WTO Government*.

Vale salientar que a IEC é uma organização internacional que define padrões para tecnologia elétrica e eletrônica; isso foi estabelecido em 1906 e composto por membros nacionais de Comitês que representam países individuais.

2.5.2 Normas de distribuidoras

Dentre as várias normas consultadas tratando-se de MR - já apresentadas neste trabalho, buscou-se explorar normas internacionais e nacionais¹ que se aplicassem a MRs do tipo Nanorrede.

A distribuidora conEdison, New York, utilizou a norma de conexão (CONEDISON, 2017) que estabelece os requisitos técnicos para microrredes interconectadas com o sistema de distribuição da Companhia Edison Consolidada². A *Southern California Edison Company* (SCE), California, utilizou a (SCE, 2019) que apresenta um manual dos requisitos necessários ao atendimento de solicitações de interconexão e apoio às análises de conformidade com o Padrão de Confiabilidade NERC(*Reliability Standard*). Porém, não trata de modo específico sobre os critérios para a conexão de microrredes, mas descreve a possibilidade de conexão de sistemas do tipo UPS (*Uninterruptible Power Source*). Já a *Xcel Energy*, Minnesota, fez uso da norma com diretrizes para interligação do armazenamento de energia (X.ENERGY, 2017) que trata escolha de configurações de armazenamento de energia. Além de discutir as diretrizes gerais para a interconexão de armazenamento de energia, como aplicativos de interconexão e revisão, telemetria e controle, medição e exportação inadvertida, que são considerações comuns para a maioria das interconexões paralelas.

Em 2017, no estado de Michigan, foi publicado um documento da autoridade regulatória alusivo à conexão de microrredes: fornece uma estrutura para o processo de interconexão de MR que não operam como produtor independente de energia. Sua capacidade de geração combinada é limitada a 5MW. As MRs operando como um produtor independente de energia (capacidade de geração superior a 5 MW) podem usar esta estrutura, contudo, necessitariam de uma negociação junto a concessionária.

Outro aspecto apontando na norma de uma distribuidora nacional (ENEL, 2019), sobre conexão de recarga para veículos elétricos, estabelece os critérios para o atendimento das solicitações de ligação nova ou alteração de carga das unidades consumidoras que contenham estações de recarga de VE e cadastro das estações em conjunto com a ANEEL.

Após a realização do levantamento de normas, é apontado um cenário embrionário na regulamentação no setor, bem como a existência de preocupações relacionadas a questões

¹ Estas não tratam ou abordam a operação de nanorredes especificamente, mas tratam, ainda que de forma primitiva, aspectos associados a microrredes.

² Responsável pela distribuição de energia em Nova York em 18 novembro 2019.

ambientais. Foi possível também identificar que o aumento no consumo de energia acarretou num aumento na capacidade instalada de GD e de sistemas de armazenamento de energia. Porém, mesmo diante dos avanços em termos de padronização, visando o crescimento no uso dos RED e MRs, existem entraves no avanço, mesmo em países cujo desenvolvimento encontra-se em outro patamar se comparado ao Brasil, como pode-se observar devido à escassez de normas de distribuidoras internacionais.

2.5.3 Normas nacionais

Esta seção se limita a explorar de forma breve os padrões nacionais que estão diretamente ligados aos componentes de uma Nanorrede e serão apresentados nas Tabelas a seguir.

Tabela 9 – Normas Técnicas Nacionais relacionadas aos sistemas fotovoltaicos das Nanorredes.

Tecnologia Abordada	Origem	Norma Técnica
Fotovoltaicos	Nacional	ABNT NBR 16149:2013 - Sistemas fotovoltaicos (FV) – Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição.
		ABNT NBR 16690:2019 - Instalações elétricas de arranjos fotovoltaicos - Requisitos de projeto.
		ABNT NBR 16150:2013 – Sistemas fotovoltaicos (FV) - Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição – Procedimento de ensaio de conformidade.
		ABNT NBR 16274:2014 – Sistemas fotovoltaicos conectados à rede – Requisitos mínimos para documentação, ensaios de comissionamento, inspeção e avaliação de desempenho.
		ABNT NBR 11704:2008 – Sistemas fotovoltaicos - Classificação.

Fonte: ABNT NBR.

Tabela 10 – Normas Técnicas Nacionais relacionadas aos inversores das Nanorredes.

Tecnologia Abordada	Origem	Norma Técnica
Inversores	Nacional	ABNT NBR IEC 62116:2012 - Procedimento de ensaio de anti-ilhamento para inversores de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica.

Fonte: ABNT NBR.

Tabela 11 – Normas Técnicas Nacionais relacionadas as GDs das Nanorredes.

Tecnologia Abordada	Origem	Norma Técnica
GD	Nacional	GED 33 – Ligação de Autoprodutores em Paralelo com o Sistema de Distribuição da CPFL. GED 15303 – Conexão de Micro e Minigeração Distribuída sob Sistema de Compensação de Energia.

Fonte: GED.

Tabela 12 – Normas Técnicas Nacionais relacionadas aos equipamentos das Nanorredes.

Tecnologia Abordada	Origem	Norma Técnica
Equipamentos	Nacional	ABNT NBR IEC 60529:2005 - Grau de proteção para invólucros de equipamentos elétricos (código IP).

Fonte: ABNT NBR.

Tabela 13 – Normas Técnicas Nacionais relacionadas aos sistema de carregamento das Nanorredes.

Tecnologia Abordada	Origem	Norma Técnica
Carregadores VE	Nacional	ABNT NBR IEC 61851-1:2013 – Sistema de recarga condutiva para veículos elétricos Parte 1: Requisitos gerais. NBR IEC 61851-23:2020 - Sistema de carregamento condutor de veículos elétrico – Parte 23: Estação de carregamento de veículo elétrico CC. ABNT NBR 61851-22:2013 - Sistema de carregamento condutor de veículo elétrico. Estação de carregamento de veículos elétricos CA. IEC 61850-90-8 - Padrão internacional para modelagem de objetos em comunicações de veículo elétrico para rede elétrica. IEC 62196-1:2012 - Tomadas, conectores e entradas de veículos – Carregamento condutor de veículos elétricos.

Fonte: ABNT NBR e IEC.

Como não há uma norma brasileira específica para sistemas de armazenamento ou BESS para aplicações em microrredes, as nanorredes dotadas de BESS devem se guiar (consultar), as diretrizes e requisitos de acordo com as normas apresentadas na Tabela 14.

Tabela 14 – Normas Técnicas Nacionais relacionadas aos sistemas fotovoltaicos das Nanorredes.

Tecnologia Abordada	Origem	Norma Técnica
Baterias	Internacional	IEC 62485-2: Safety requirements for secondary batteries and battery installations - to meet requirements on safety aspects associated with the erection, use, inspection, maintenance and disposal: Nonchemistry Specific (applicable to all secondary battery types). IEC 62933-5-2 ED1: Electrical energy storage (EES) systems Part 5- 2: Safety requirements for grid integrated EES systems - electrochem-ical based systems. IEC 62619: Secondary cells and batteries containing alkaline or other non-acid electrolytes - Safety requirements for secondary lithium cells and batteries, for use in industrial applications. UL 1973: Standard for Batteries for Use in Stationary, Vehicle Auxiliary Power and Light Electric Rail (LER) Applications. UL 9540: Standard for Energy Storage Systems and Equipment. IEEE 1187: Recommended Practice for Installation Design and Installation of Valve-Regulated Lead-Acid Batteries for Stationary Applications. IEEE 1661: Guide for Test and Evaluation of Lead-Acid Batteries Used in PV Hybrid Power Systems. IEEE 1679: Recommended Practice for the Characterization and Evaluation of Emerging Energy Storage Technologies in Stationary Applications.

Fonte: IEC, UL e IEEE.

Em situações na qual o inversor instalado na nanorrede têm potência até 10 kW, conectado à rede de distribuição, sugere-se que seja aplicado a determinação da Portaria INMETRO nº 017/2016, de 14/01/2016, de modo que o inversor para sistema fotovoltaico deverá ser fabricado e importado somente em conformidade com os requisitos da Portaria INMETRO nº 004/2011 de 04/01/2011, devidamente registrados no órgão. Considerando os demais equipamentos e subsistemas da nanorrede, estes de responsabilidade da unidade consumidora acessante e obrigatoriamente indicar a normatização técnica tal qual o projeto de conexão, e relativo

aos conversores assumi-se total responsabilidade por da adequação e aderência aos requisitos específicos.

Ademais, os subsistemas das nanorredes devem atender os requisitos do PRODIST, a priori aos estabelecidos nos módulos Módulo 3 e Módulo 8, como mencionado anteriormente ao longo dessa seção.

2.6 Normas - Conexão de fontes de geração fotovoltaica

A conexão de sistemas de geração distribuída fotovoltaicas nas redes de distribuição de energia elétrica devem atender aos requisitos técnicos e regulatórios para garantir a qualidade do fornecimento e segurança de operadores das instalações. O Brasil já possui normas regulatórias e técnicas implementadas em vigor. Porém há grandes esforços para a normalização de mínimos requisitos que possam ser utilizados como referência global na conexão desses sistemas às redes elétricas.

2.6.1 Normas técnicas internacionais

Um breve resumo das normais técnicas internacionais são apresentadas nas Tabelas 15 e 16, respectivamente.

2.6.2 Normas técnicas nacionais

O Brasil possui as normas técnicas vigorando aplicadas a projetos, instalações e ensaios de sistemas de geração fotovoltaicos. Adicionalmente, na Tabela 17, serão apresentadas outras normas aplicadas especificamente aos componentes dos sistemas fotovoltaicos: inversores, módulos fotovoltaicos e acumuladores de energia.

2.7 Operação de sistemas de armazenamento de energia

A escolha do tipo mais adequado e dimensionamento ideal do SAE em uma MR é um desafio diante das diversas possibilidades de tecnologias. Escolher um sistema adequado para uma aplicação específica requer alguns conhecimentos prévios, dentre eles a capacidade desejada. Portanto, para um uso mais amplo dos SAE, é necessário analisar as possibilidades e comparar a qualidade e o desempenho das diferentes tecnologias. É necessário, disponibilizar uma diretriz clara para auxiliar os usuários no critério de seleção ideal do tipo e capacidade do SAE, de forma que as partes interessadas possam avaliar a viabilidade dos investimentos.

Diante da grande inserção de energias renováveis, que tem a característica própria de intermitência; e ao fator – por parte da carga – oscilação da carga, para manter o equilíbrio adequado carga/geração, que garantirá a operação dentro dos requisitos de qualidade de tensão e frequência (já mencionados ao longo do capítulo), pode ser necessário o uso de tecnologias que disponibilize maior flexibilidade na absorção ou fornecimento de potência ativa e reativa. Nesse

Tabela 15 – IEEE: Normas técnicas internacionais para conexão de fontes de geração fotovoltaica.

IEEE	1547-2018	<i>Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces</i>	Especificações técnicas e testes da interconexão e interoperabilidade entre a rede da concessionária e os recursos da GD (potência de até 10 MVA).
IEEE	1547.1-2005	<i>Standard Conformance Test Procedures for Equipment Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems</i>	Traz informações sobre interconexão dos recursos distribuídos (GD, entre os quais, a fotovoltaica e SAE) com os sistemas de energia elétrica da concessionária.
IEEE	1547.2-2008	<i>Application Guide for IEEE Std 1547 for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems</i>	Guia de aplicação no uso do IEEE Std 1547, caracterizando as formas de tecnologias de GD e seus problemas de interconexão associados.
IEEE	1547.3-2007	<i>Guide for Monitoring, Information Exchange, and Control of Distributed Resources Interconnected with Electric Power Systems</i>	Guia que facilita a interoperabilidade de recursos de GD e a implementar monitoramento, troca de informações e controle no apoiar as operações técnicas e comerciais entre as partes interessadas.
IEEE	1547.4-2011	<i>Guide for Design, Operation, and Integration of Distributed Resource Island Systems with Electric Power Systems</i>	Guia com soluções e boas práticas para projeto, operação e integração de MR ou sistemas autônomos (<i>offgrid</i>) interconectados com a rede de distribuição de energia elétrica.
IEEE	1547.6-2011	<i>Recommended Practice for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems Distribution Secondary Networks</i>	Recomendações para a interconexão de recursos distribuídos (GD e SAE) com as redes de distribuição secundária da concessionária.
IEEE	1547.7-2013	<i>Guide for Conducting Distribution Impact Studies for Distributed Resource Interconnection</i>	Guia com informações de análise de impactos na rede de distribuição devido à inserção de recursos distribuídos (GD ou armazenamento).

Fonte: IEEE.

Tabela 16 – IEC, EN e VDE: Normas técnicas internacionais para conexão de fontes de geração fotovoltaica.

IEC	61727-2004	<i>Photovoltaic (PV) Systems - Characteristics of the Utility Inter-face</i>	Aplicada aos sistemas de energia PV (menor ou igual a 10 kVA) interconectados e operando em paralelo com rede elétrica.
IEC	TS 61836-2016	<i>Solar photovoltaic energy systems - Terms, definitions and symbols</i>	Traz termos, definições e símbolos das normas nacionais e internacionais de energia solar PV e documentos relevantes à área.
IEC	61000-3-3-2017	<i>Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 3-3: Limits – Limitation of voltage changes, voltage fluctuations and flicker in public low-voltage supply systems, for equipment with rated current ≤ 16 A per phase and not subject to conditional connection</i>	Refere-se à limitações de flutuações de tensão e cintilação de tensão no sistema público de baixa tensão. Especifica os limites das mudanças de tensão que podem ser produzidas por um equipamento testado sob condições especificadas e fornece orientações sobre métodos de avaliação.
IEC	60364-7-712-2017	<i>Low voltage electrical installations – Part 7-712: Requirements for special installations or locations – Solar photovoltaic power supply systems</i>	Aplicada à instalação elétrica de sistemas PV. Os equipamentos de uma instalação fotovoltaica, são tratados apenas no que diz respeito à sua seleção e aplicação na instalação.
EN	50438: 2013	<i>Requirements for Microgeneration Plants to be Connected in Parallel with Public Low-voltage Distribution Networks</i>	Define os requisitos técnicos para as funções de proteção e os recursos operacionais das usinas de microgeração(até 50 kW), projetadas para operação em paralelo com redes públicas de distribuição de baixa tensão. Apresenta os requisitos para conexão, qualidade de energia, operação, segurança e comissionamento.
VDE	AR-N 4105:2018	<i>Generators connected to the low-voltage distribution network. Technical requirements for the connection to and parallel operation with low-voltage distribution networks</i>	Guia VDE(Alemanha) com requisitos técnicos para a conexão de unidades de geração distribuída e armazenamento à rede de baixa tensão de um operador da rede de distribuição. Orientações para o planejamento e a tomada de decisões, tanto para operadores de rede quanto para instaladores.

Fonte: IEC, EN e VDE.

Tabela 17 – ABNT: Normas técnicas nacionais para fontes de geração fotovoltaica.

ABNT	NBR 16149:2013	<i>Sistemas fotovoltaicos – Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição</i>	Recomendações específicas para a interface de conexão entre os sistemas fotovoltaicos e a rede de distribuição de energia elétrica, além de estabelecer seus requisitos.
ABNT	NBR 16690:2019	<i>Instalações elétricas de arranjos fotovoltaicos - Requisitos de projeto</i>	Requisitos de projeto das instalações elétricas de arranjos fotovoltaicos, incluindo disposições sobre os condutores, dispositivos de proteção elétrica, manobra, aterramento e equipotencialização do arranjo fotovoltaico. Não incluindo os SAE, unidades de condicionamento de potência ou as cargas.
ABNT	NBR 16150:2013	<i>Sistemas fotovoltaicos - Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição – Procedimento de ensaio de conformidade</i>	Procedimentos de ensaio para verificar se os equipamentos utilizados na interface de conexão entre o sistema fotovoltaico e a rede de distribuição de energia estão em conformidade com os requisitos da ABNT NBR 16149.
ABNT	NBR 16274:2014	<i>Sistemas fotovoltaicos conectados à rede – Requisitos mínimos para documentação, ensaios de comissionamento, inspeção e avaliação de desempenho.</i>	Estabelece as informações e a documentação mínimas que devem ser compiladas após a instalação de um sistema fotovoltaico conectado à rede.
ABNT	NBR 11704:2008	<i>Sistemas fotovoltaicos - Classificação</i>	Classifica os sistemas de conversão fotovoltaica de energia solar em energia elétrica.
ABNT	NBR 10899:2013	<i>Energia solar fotovoltaica – Terminologia</i>	Especifica os termos técnicos relativos à conversão fotovoltaica de energia e radiação solar em energia elétrica.

Fonte: ABNT NBR.

sentido, os SAE exercerão um papel fundamental para garantir a qualidade e operação das MRs, sobretudo na condição na qual poderão acontecer o ilhamento.

De modo geral, para tais sistemas há possibilidades basicamente para duas configurações, a que o SAE agregado dispõe um conjunto de dispositivos dotados de capacidade de armazenamento de energia instalados em um mesmo local e para o caso de SAE distribuído é possível conectar ao lado gerador ou ao lado da carga. Do ponto de vista funcional, os SAE podem fornecer potência para controle da estabilidade transitória/dinâmica, controle de frequência, desbalanço carga/geração, entre outras funções dinâmicas. Por outro lado, principalmente, para fornecimento de energia para atendimento ao consumo das cargas.

2.7.1 Normas - Conexão de sistemas de armazenamento

Com relação às normas de conexão dos SAE, por se tratar de tecnologias novas em aplicações envolvendo sistemas de energia elétrica, não há exclusivamente tópicos dentro das normas que explore especificamente os requisitos mínimos para a conexão e operação. Visto que as normas internacionais e nacionais, não contém as orientações relativas ao SAE. Porém, diante da similaridade em algumas características com outros dispositivos na rede elétrica, esses podem ser classificados no grupo de GD (IEEE-STD1547, 2018).

Os critérios para a interoperabilidade de uma ou mais fontes distribuídas conectadas ao sistema elétrico de potência segue o padrão da norma (IEEE-STD1547, 2018). Essas fontes são as: geração solar fotovoltaica, célula de combustível, geração eólica, microturbinas, sistemas de armazenamento de energia e demais tipos de geração distribuída. A norma descreve também a funcionalidade, os parâmetros e metodologias para monitoramento, a troca de informação e controle para as fontes distribuídas conectadas ou associadas ao sistema elétrico. Portanto, sugere-se que a regulação, conexão e operação também podem ser consideradas para SAE.

Ainda destacando alguns pontos da norma (IEEE-STD1547, 2018), especificamente na Seção 4 dela, alguns requisitos básicos devem ser cumpridos na operação dos SAE, este apresentados de forma breve na Tabela 18.

Tabela 18 – Requisitos básicos para operação do SAE.

Requisitos básicos	Descrição
Tensões aplicáveis	Características das tensões aplicáveis quando o PAC está localizado na média ou na baixa tensão.
Precisão de medidores instalados	Precisão dos medidores que deverão ser instalados deve estar dentro dos limites especificados.
Requisitos para a Reconexão	No estado de reconexão com a rede, os dispositivos de GD não devem injetar potência ativa para rede no seu período transitório.
Conexão com a Rede	Tensão da rede e a frequência precisam estar dentro dos limites especificados.

Fonte: (IEEE-STD1547, 2018).

Na Figura 4 são apresentados de maneira detalhada os modos operacionais. Portanto, o restabelecimento do serviço é realizado primeiro desligando as unidades de geração de distribuição e, a seguir, religando-as de forma controlada. Destacando apenas as condições de operações abordadas no trabalho.

Ao considerar os limites operativos requeridos para detecção de ilhamento no IEEE percebe-se que há diferenças entre os limites impostos nas normas IEC, como mostrado na Tabela 19. Embora as normas internacionais geralmente são utilizadas como fonte de embasamento teórico e diretrizes, no Brasil, exceto quando houver lacuna(s) normativa, os limites referenciados devem ser os estabelecidos no PRODIST e nas normas brasileiras apropriadas.

Tabela 19 – Limites de tensão e frequência – Padrão IEEE versus IEC.

IEEE		IEC Std.	
Limites de frequência	Tempo de compensação (s)	Limites de frequência	Tempo de compensação (s)
$f < 59.3$	0.16	$f < 59$	0.1
$f > 60.5$	0.16	$f > 61$	0.1
Limites de tensão (V_{rms})	Tempo de compensação (s)	Limites de tensão (V_{rms})	Tempo de compensação (s)
$V < 0.5V_n$	0.16	$V < 0.5V_n$	0.1
$0.5V_n < V < 0.88 V_n$	2	$0.5V_n < V < 0.85 V_n$	2
$1.1V_n < V < 1.2 V_n$	1	$V_n < V < 1.1 V_n$	2
$1.2V_n < V$	0.16	$1.1V_n < V < 1.35 V_n$	0.05

Fonte: Adaptado de (PALIZBAN; KAUHANIEMI; GUERRERO, 2014).

2.8.1 Modo conectado

No modo conectado a frequência e amplitude da tensão são impostas pela rede principal, suprimindo totalmente ou parcialmente as cargas ou injetando energia na própria rede, cabendo à MR gerenciar sua produção e consumo de energia (LOPES; MADUREIRA; MOREIRA, 2013; ROBERT et al., 2012). O gerenciamento deste fluxo deverá levar em consideração os aspectos econômicos, técnicos e restrições operacionais, que dependem entre outros fatores, da arquitetura da MR, quantidade e tipos de RED e perfis de carga (ZIA; ELBOUCHIKHI; BENBOUZID, 2018). As informações recebidas do nível de tensão e frequência da rede irão garantir a transição planejada para o modo isolado quando for solicitado.

A operação do modo conectado pode ser dividida em casos onde toda a energia produzida é consumida pela carga do cliente (não exportação) e aqueles em que parte dessa energia é exportada para o sistema de distribuição da concessionária (exportação). A exportação é definida em relação ao PAC, onde a rede da concessionária se conecta à MR. Em grande parte dos casos, o valor é mensurado pelo medidor de faturamento, podendo estar associado a uma chave seccionadora ou algum outro equipamento, conforme definido pela concessionária.

Na condição de operação de exportação toda a energia produzida é consumida pela carga do cliente. Do ponto de vista da concessionária local, a energia fornecida ao ligar um gerador de não-exportação equipara-se a desligar a carga elétrica. Os requisitos de interconexão da instalação desse tipo de geração são simplificados, porque há menos risco de fluxo reverso

de energia para a rede distribuição e de ilhamento não intencional. Porém, na operação de exportação e compensação de energia, em algumas instalações, incluindo eólica e solar, essas exportam intencionalmente para suportar a impossibilidade de despacho de suas fontes de energia. A medição de energia líquida é o termo tarifário usado para geradores que podem exportar o excedente para a rede. A energia exportada para a concessionária é subtraída da energia importada, de modo que cliente pague pela quantidade líquida utilizada - estabelecida na Resolução Normativa ANEEL n° 517.

Os requisitos mínimos de operação são estabelecidos por norma e foram apresentados na Seção 2.5. Nesse sentido, os valores de tensão em BT, limites de tensão em regime permanente, limites para o desequilíbrio de tensão, variação de frequência (Tabelas 6 e 7) e limites de distorções harmônicas.

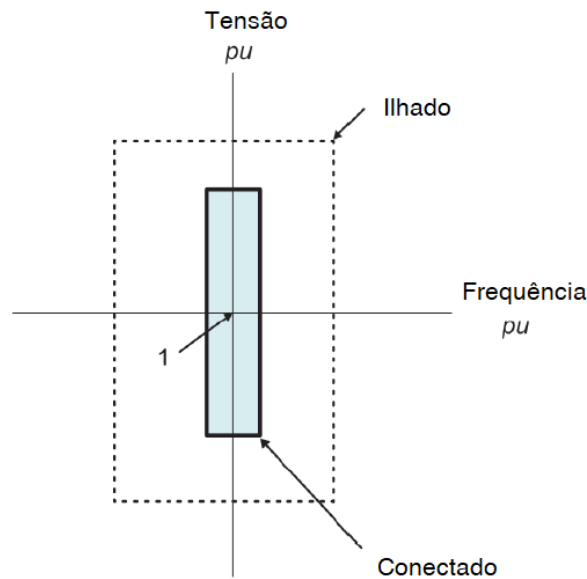
2.8.2 Modo ilhado

Considerando agora o modo de operação ilhado, no qual MR deve ser capaz de gerar energia ativa e reativa suficiente para atender à demanda das cargas locais, manter a estabilidade de frequência e operar dentro dos limites aceitáveis de tensão. Nesse modo, a tensão e a frequência são determinadas pela operação dos seus RED e, portanto, um esquema de controle apropriado é necessário para garantir uma operação estável e resiliente. A MR também pode operar permanentemente em locais distantes ou de difícil acesso que não são atendidas pela distribuidora de energia elétrica. Caso a capacidade de geração seja menor que a demanda nominal as cargas com menor grau de importância serão reduzidas ou mesmo desligadas, de acordo com uma lista de prioridades.

A MR pode ir para o modo de ilhado quando os requisitos de qualidade e estabilidade de energia não forem totalmente atendidos pela rede principal (no intuito de proteger seu equipamento e manter sua integridade). Considerando um gerador de pequeno porte isolado alimentando uma MR, é muito diferente do caso conectado à rede elétrica por ser ele responsável em determinar a frequência. Da mesma forma, a função do gerador no controle da tensão difere para MRs isoladas e aquelas conectadas à rede principal. Em uma rede isolada, o RED deve controlar a tensão, enquanto em um sistema conectado à rede o controle de tensão na interconexão é alcançado através da coordenação de diversos fatores, incluindo o próprio produtor, outros geradores na rede, bem como a operação de dispositivos, como bancos de capacitores instalados na rede da concessionária.

Usualmente as MRs tem os requisitos de tensão e frequência flexibilizados, com mostrado na Figura 5. Em função da impossibilidade de segmentar as cargas da MR em função da capacidade de operar em condições anormais, o critério adotado é que, em termos de limites operativos de tensão, frequência e qualidade da energia, os requisitos são os mesmos para operação interconectada.

Figura 5 – Faixas de variação de tensão e frequência nos modos interligado e ilhado/isolado.



Fonte: Adaptado de (IEEE-STD2030.8, 2018).

2.8.3 Modo de transição

No momento de transição entre os modos conectado à rede para a operação isolada da microrrede, a ação deve ser rápida, de maneira que a tensão e frequência respeitem valores normalizados (BHASKARA; CHOWDHURY, 2012).

Adicionalmente as informações, o ilhamento pode ocorrer de duas formas, seja ele no modo intencional que acontece quando a rede elétrica principal encontra-se em manutenção ou por algum critério econômico ou não intencional, que advém por alguma contingência da rede ocasionados por severos distúrbios – como por exemplo um afundamento de tensão no ponto de acoplamento comum ou uma possível falta na rede principal. Considerando em ambos os casos a chave estática possui um papel importante na transição devido aos pontos já mencionados.

Podendo ainda afirmar que no modo ilhamento não intencional a transição é complexa, pois necessita de uma detecção precisa ser rápida para ocorrer uma transição no menor tempo possível (SOSHINSKAYA et al., 2014). Caso não seja detectado, toda a microrrede deve ser desativada. A sua reconexão com a rede principal é realizada somente quando houver sincronismo, ou seja, nas condições de mesma amplitude de tensão, frequência e fase, dentro de um limiar de tolerância e a operação deve haver um auxílio de um sistema SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) que é controlado pelo CCMR em conjunto com a chave estática, que deve atender a diferença de tensão e frequência entre a microrrede e à rede principal estabelecidas em norma. No caso de uma interrupção total do atendimento às cargas ilhadas, um procedimento de reinicialização, conhecido como *black start*, deverá ser realizado para o restabelecimento da MR.

O trabalho de tese apresentará como foco principal o modo ilhado devido aos grandes

desafios de operação encontrados nessa configuração. Além do estudo na implementação do controlador proposto para melhoria de estabilidade diante da variação de carga e geração solar.

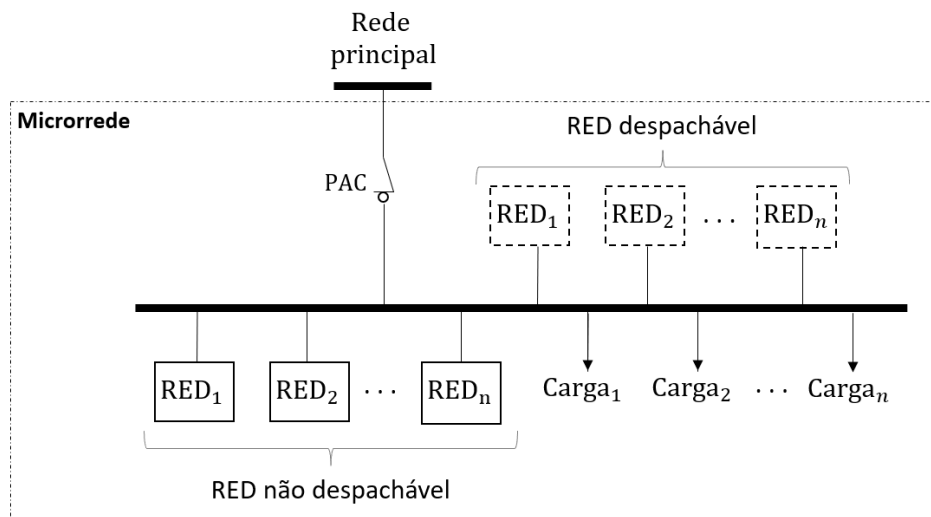
2.9 Ilhamento de Microrredes

Ao definir MR, o principal aspecto de operação é a sua capacidade de operar nos modos conectado à rede, ilhado e a transição entre os modos. A transição sem interrupção é fundamental para a MR ter a capacidade de operar com confiabilidade. Esta operação pode apresentar diversos desafios, principalmente quando for não intencional (KATIRAEI; IRAVANI; LEHN, 2005).

2.9.1 Modos de controle em ilhado e conectado

A Figura 6 apresenta uma topologia genérica de microrrede com RED despacháveis e não despacháveis. Os despacháveis, a exemplo o BESS, cuja fonte primária armazena energia, permitindo assim o controle do despacho de potência e capaz de operar no modo de controle P/Q ou V/f . No modo controle P/Q , o RED fornece potência ativa e reativa constantes de acordo com os *setpoint*. No modo controle V/f , o RED fornece potência ativa e reativa necessárias para controlar a amplitude e frequência da tensão em valores de *setpoint*. Entretanto, os RED não despacháveis são os considerados com gerações intermitentes e possuem fonte primária sem armazenamento de energia. Com isso, operam no modo de controle P/Q , onde a potência ativa é tipicamente a máxima potência extraída das fontes renováveis e a potência reativa segue um valor *setpoint*.

Figura 6 – Topologia genérica de MR com RED despacháveis e não despacháveis.

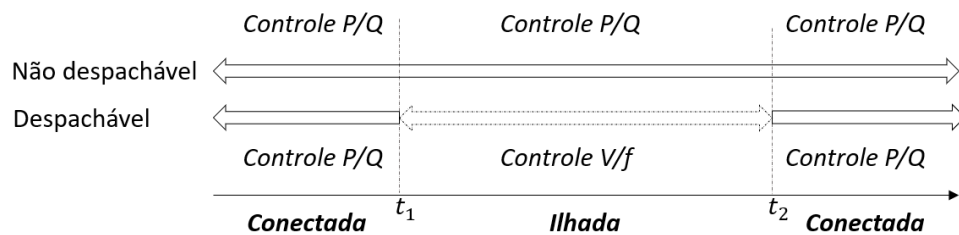


Fonte: Próprio autor.

A Figura 7 mostra a operação do controle em escala temporal. Considerando o instante t_1 a MR é ilhada e no instante t_2 é novamente conectada à rede principal. Como observado,

entre os instantes de tempo a MR opera em modo ilhado e os RED despacháveis atuam no controle de tensão e frequência, através da utilização do controle primário. O capítulo 3 explora detalhadamente o controle implementado nos conversores eletrônicos de potência dos RED. Ao operar fora dos instantes de tempo t_1 e t_2 , a MR opera com amplitude da tensão e frequência impostas pela rede principal. Desta forma, os RED despacháveis operam com o controle P/Q seguindo referências *setpoint*. Os RED não despacháveis operam continuamente no controle P/Q .

Figura 7 – Controle dos RED despacháveis e não despacháveis nos modos de operação da MR.



Fonte: Próprio autor.

2.9.2 Chaveamento dos controles dos conversores

Nas condições que se tem o RED despachável ou não despachável, conectada ou ilhada, podem impor a necessidade dos RED realizarem o chaveamento entre as topologias de controle nas transições do modo de operação da MR.

Os RED despacháveis em que se utilizam o BESS, geralmente, a topologia aplicada no modo conectado é o controle de corrente, a fim de controlar o fluxo de potência ativa e reativa despachada pelo RED à rede, tendo o objetivo de controle P/Q . Já a topologia controle de tensão é utilizada no modo ilhado, a fim de controlar a amplitude da tensão e frequência da MR, sendo o objetivo de controle V/f . Os RED não despacháveis mantêm constantemente o controle de corrente com objetivo de controle P/Q (LOPES; MOREIRA; MADUREIRA, 2006; BIDRAM; DAVOUDI, 2012; GUERRERO et al., 2010; DAS; GURRALA; SHENOY, 2017).

Ao considerar as oscilações ocorridas na transição dos modos conectados e ilhado da MR, o controle do RED é capaz de atuar no controle da amplitude e da duração da oscilação e deve ser capaz de suportar grandes oscilações e manter as condições de operação dentro das faixas aceitáveis (GANJIAN-ABOUKHEILI et al., 2019). Dentre alguns problemas que podem ocorrer durante um ilhamento não intencional, surgem do chaveamento dos controles dos conversores dos RED despacháveis. Estes acarretam transitórios elétricos na amplitude e frequência da tensão, e há uma necessidade de rápida detecção de ilhamento para chaveamento dos controles (TIRUMALA; MOHAN; HENZE, 2002; YAO; XIAO; YAN, 2009; DAS; GURRALA; SHENOY, 2017; GAO; IRAVANI, 2008).

Ainda considerando as dificuldades e desvantagens, os autores (GAO; IRAVANI, 2008)

propuseram que os conversores dos RED despacháveis operem continuamente na topologia de controle de tensão, com isso não haverá necessidade do chaveamento de controle durante as transições. Adicionalmente, os autores (LI; KAO, 2009; VASQUEZ et al., 2009; FU et al., 2013; LOU et al., 2017a; ABADI; SADEGHZADEH, 2019) propoem ideias similares com operações únicas dos conversores.

A análise do processo de ilhamento das MRs, a depender da situação, é fundamental na escolha da estratégia adotada tendo um papel decisivo na capacidade de manter continuidade de operação da MR. Diante da imprevisibilidade do ilhamento não intencional, é necessário uma análise minuciosa nas formas de ocorrência e o entendimento do chaveamento em situações críticas. Na condição onde a MR detecta uma falha ou problemas relacionados a qualidade de energia na rede principal o PAC abrirá para proteger o sistema. Em outra condição na qual o desligamento da rede principal ocorra de forma abrupta, o controle da microrrede deve atuar para garantir a proteção e controle para dar continuidade de operação. Dessa forma, os períodos de tempos envolvidos influenciam diretamente nos chaveamento de controle.

2.9.3 Estudos relacionados ao ilhamento de MRs

Os estudos apresentados a seguir tratam do ilhamento de MR atrelados aos problemas de chaveamento do modo de controle dos conversores no momento de transição(conetado-ilhado).

O foco dos estudos de (TIRUMALA; MOHAN; HENZE, 2002; YAO; XIAO; YAN, 2009; CHEN et al., 2009; TALAPUR et al., 2018; ZHENG et al., 2019) são relacionados aos transitórios elétricos durante o chaveamento abruptos. Nestes trabalhos são propostos topologias de controle para minimizar ocorrências dos transitórios elétricos e garantir transições suaves, no entanto, em alguns deles não é levado em consideração os tempos de atraso no chaveamento, de tal forma que o chaveamento de controle é feito no mesmo instante da abertura do PAC.

Nos trabalhos (DAS; GURRALA; SHENOY, 2016; DAS; GURRALA; SHENOY, 2017) são apresentados as condições de ilhamentos por desconexão da rede principal, considerando atrasos de tempo, e propostos topologias de controle para obter uma transição suave. Porém, apenas o foco nos transitórios ocorridos no instante de chaveamento e não no impacto causado na MR durante o atraso de tempo na transição.

Em (MOHAMED; RADWAN, 2011; MOHAMED et al., 2011; WANG et al., 2015) é proposto topologia de controle do chaveamento à nível do controle de potência apenas, conversor opera com controle de tensão ativo em ambos modos de operação, também não levam em consideração os atrasos de tempo ou cargas externas no ilhamento da MR.

Em (GANJIAN-ABOUKHEILI et al., 2019) é realizado um estudo de ilhamento de uma MR formada somente por RED baseados em conversores eletrônicos de potência). O foco do trabalho está na proposta de um controle de tensão e controle *droop* modificados, que apresentem melhor suavização das oscilações de tensão, corrente e frequência e garantam uma transição

suave do que o controle de tensão e *droop* convencionais.

Em (ISSA et al., 2017) é proposto uma estratégia de controle para RED do tipo BESS e FV utilizando controle da tensão do link CC dos conversores. Geralmente, os trabalhos utilizam modelos dos RED com fontes de tensão CC ideal do lado CC, com o estudo e proposto de controle do conversor CC/CA. O trabalho utiliza uma MR com um BESS e um FV e sem carga, avaliando apenas a dinâmica da tensão CC dos conversores e a fluxo de potência.

Um estudo comparativo da performance dos modelos de BESS é realizado em (FARROKHABADI et al., 2017). O trabalho abrange diferentes modelos, com foco nos estudos de conversores eletrônica de potência pelo modelo de valores médios e pelo modelo chaveado. A fonte CC é estudada por um modelo de fonte CC ideal e por um modelo detalhado da fonte primária e os respectivos controles. A estabilidade dos modelos mais completos são apresentados, e verifica-se que a dinâmica da tensão do link CC e o chaveamento dos conversores contribuem para o problema de estabilidade.

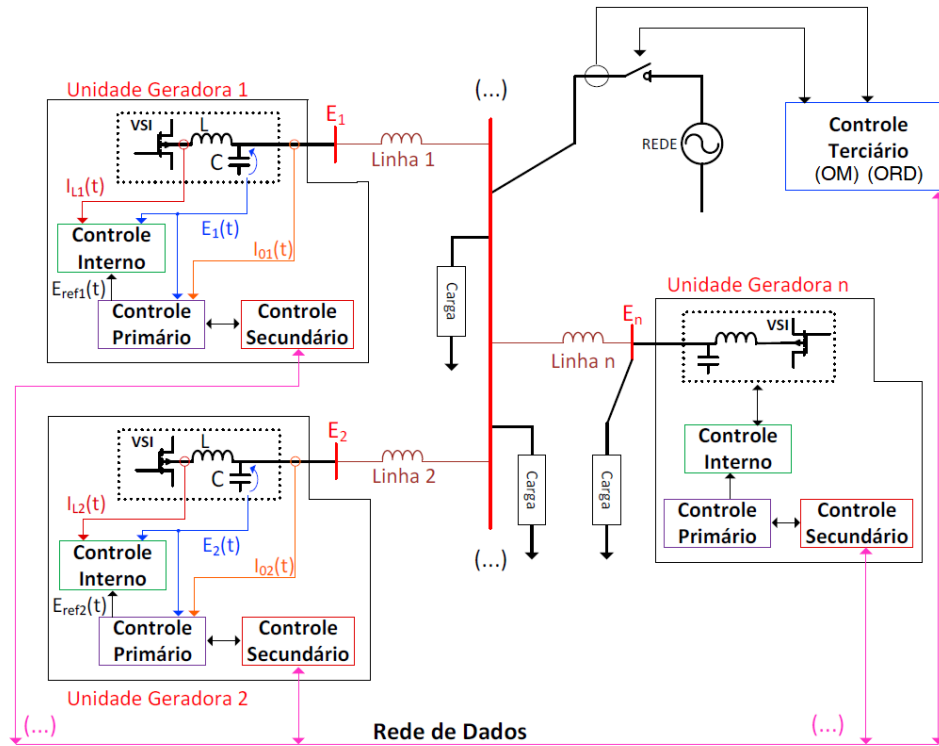
2.10 Controle Hierárquico

A adoção de uma estrutura hierárquica de controle é bastante atraente por segmentar o controle em níveis hierárquicos, que possibilitará a combinação de processos com dinâmicas e bandas de frequência distintas, sem prejuízo no controle de cada camada. O controle deve garantir a operação de maneira flexível, mantendo níveis adequados de frequência e tensão e estabilidade do sistema, independentemente do seu modo de operação. Diversas classificações de controle são apresentadas na literatura, porém há uma classificação usualmente utilizada - dividida em níveis e apresentada na Figura 8 (EID et al., 2014; SAHOO; SINHA; KISHORE, 2017).

O desenvolvimento de MRs que possibilitam operar conectadas ao sistema elétrico ou isoladas demanda ações e estruturas complexas de controle e gerenciamento. Entretanto, existem diferenças significativas entre os grandes sistemas de potência CA e as MRs, o que torna necessário o desenvolvimento de controles e sistemas de gerenciamento de energia específicos para MRs (GUERRERO et al., 2010).

Como pode ser visto na Figura 8, a estrutura de controle hierárquico é normalmente disposta em três níveis de controle: Primário, Secundário e Terciário. Na literatura alguns autores incluem também um nível que compreende as malhas de controle interno dos conversores, denominado de controle interno (GUERRERO et al., 2010; HATZIARGYRIOU, 2014; CARVALHO, 2019)

Figura 8 – Diagrama típico de uma microrrede CA com controle hierárquico.



Fonte: Adaptado de (CARVALHO, 2019).

Cada nível, além de executar seus próprios processos de controle, exerce um monitoramento supervisão sobre a camada adjacente inferior, influenciando nos processos da mesma. As principais funções de controle de uma MR citadas em (BIDRAM; DAVOUDI, 2012) são: regulação de tensão e frequência em ambos modos de operação, adequado compartilhamento de potência e coordenação entre os RED, resincronização da MR com a rede principal, controle do fluxo de potência entre a MR e a rede principal e otimização dos custos operacionais da MR. Tais funções possuem diferentes níveis de relevância, requisitos de infraestrutura, escalas de tempo e velocidade de resposta, consequentemente utilizam uma estrutura de controle hierárquico.

Na arquitetura do controle de MRs são três as abordagens básicas identificadas: centralizada, descentralizada e distribuída. O controle centralizado tem dependência entre os dados coletados e um controle centralizado dedicado a partir de um único ponto, que exige ampla comunicação entre o controlador central e as suas unidades controladas. Por outro lado, no controle descentralizado, cada unidade é controlada localmente, recebendo apenas dados locais e não possui informações das várias dos outros sistemas e também das ações dos outros controladores. Uma solução apresentada é o controle hierárquico que irá possibilitar o controle centralizado e descentralizado (OLIVARES et al., 2014). Já na estrutura de controle totalmente distribuído informações são trocadas entre todos os controladores locais, de modo que cada um deles tem algum conhecimento sobre o comportamento dos outros.

Nas seções a seguir – ainda neste capítulo, esses níveis de controle são apresentados de forma mais detalhada, e na Seção 3.2.4 também será descrito o controle interno, que é dedicado aos conversores de interface entre o recurso energético distribuído e a MR.

2.10.1 Controle Primário

O nível primário é o primeiro e mais rápido nível de controle da hierarquia. Considerado o nível mais baixo da microrrede, que tem como sua principal função controlar as variações locais de tensão, frequência, potência ativa e reativa de uma microfonte distribuída. O controle pode controlar cargas elétricas locais e as microfones. Ele baseasse em medidas localmente e não requer comunicação. Suas principais funções são (BIDRAM; DAVOUDI, 2012):

- a) Estabilizar tensão e frequência imediatamente após o ilhamento ou em variações de carga durante a operação ilhada, que poderiam levar a MR a instabilidade devido ao desbalanço entre potência gerada e consumida;
- b) Suavizar a circulação de correntes que possam causar sobrecorrentes nos dispositivos de eletrônica de potência e danificá-los;
- c) Compartilhamento ideal de potência ativa e reativa entre os RED, de preferência sem necessidade de comunicação entre eles, além de fornecer funcionalidade de *plug and play*;
- d) Controlar a potência gerada por microfones e a consumida por cargas controláveis;
- e) Detectar ilhamento, com capacidade de operar conectado ou ilhado da rede principal;
- f) Fornecer referências de amplitude da tensão e frequência para os laços internos de controle de tensão e corrente, os quais são normalmente referenciados como nível zero de controle.

O controle primário, usualmente, é implementado como controle local em cada RED despachável. Quando a MR opera ilhada, a função básica do controle primário é estabilizar tensão e frequência da MR após distúrbios. Para que seja realizada, os RED devem fornecer a potência ativa e reativa demanda pelas cargas, atingindo um equilíbrio entre geração e carga. Na situação onde os RED operando em paralelo na MR, a potência ativa e potência reativa a serem fornecidas para as cargas devem ser compartilhadas de forma adequada pelos RED, considerando também função do controle primário (BIDRAM et al., 2013).

O paralelismo entre conversores oferece alta confiabilidade, entretanto em caso de falha do conversor, os demais podem fornecer a potência necessária para a carga. Assim, os conversores operando em paralelo sem controle para compartilhamento adequado de potência são submetidos a elevada corrente entre eles (BORUP; BLAABJERG; ENJETI, 2001; BIDRAM et al., 2013).

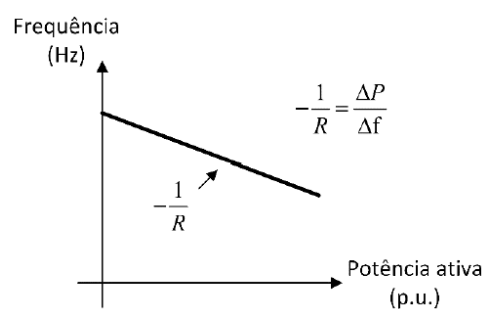
Diante da necessidade de realizar o controle compartilhado de potência entre diversos conversores que operam em paralelo, é fundamental a utilização de canais de comunicação entre

os conversores. O método fornece alta precisão, porém requer alta largura de banda nos canais de comunicação e uma utilização de um conversor operando como *master*, impossibilitando disponibilizar redundância completa e uma operação independente entre os conversores (TAYAB et al., 2017). Outro ponto relevante, é não oferecer a funcionalidade *plug and play*, uma vez que a adicionar um novo RED a MR será necessário alterar a estratégia de controle das unidades existentes. No intuito de fornecer um compartilhamento de potência com cada conversor operando independentemente e consequentemente maior confiabilidade, estudos apontam amplas aplicações utilizando o método *droop* (BORUP; BLAABJERG; ENJETI, 2001; BIDRAM et al., 2013; TAYAB et al., 2017).

O controle primário pelo método *droop* foi proposto inicialmente para a operação paralela do UPS (CHANDORKAR; DIVAN; ADAPA, 1993). O método é bastante difundido na literatura para aplicações em controle primário de conversores eletrônicos de potência por ser um controle independente, fácil implementação, robusto, autônomo e sem conexões que elimina os canais de comunicação entre os conversores e possibilita a funcionalidade de *plug and play*. O método provém do princípio do balanço de potência de geradores síncronos em grandes sistemas de potência interconectados, no qual um desequilíbrio entre a potência mecânica de entrada do gerador e sua potência elétrica ativa da saída causa uma mudança na velocidade do rotor que é traduzida em um desvio de frequência. De forma similar, a variação da potência reativa de saída resulta num desvio na amplitude da tensão. Portanto, o controle *droop* é intrínseco à operação em regime permanente das unidades geradoras convencionais.

Na ocorrência de um desbalanço de carga-geração no sistema, os geradores conectados diretamente à rede buscam restabelecer a condição de equilíbrio a partir da resposta inercial, através da energia cinética armazenada em suas massas girantes. A Figura 9 apresenta uma curva característica de regulação primária (*droop*) típica de geradores elétricos. O controle de frequência primário busca estabelecer uma nova condição de equilíbrio para o sistema, que dispensará o uso da energia cinética dos rotores (RÊGO, 2017).

Figura 9 – Curva característica de regulação primária.

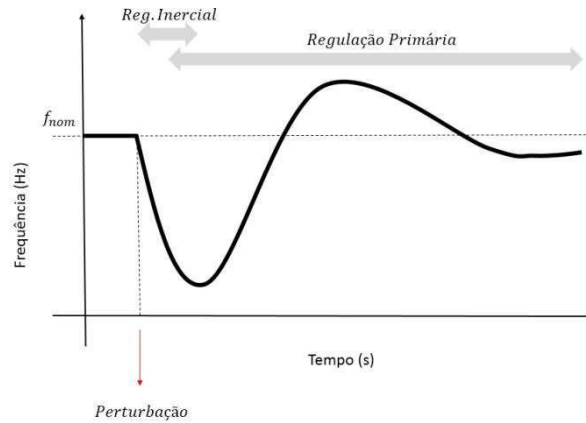


Fonte: (RÊGO, 2017).

Claramente observa-se que para uma redução de frequência há um aumento de potência solicitada, de modo a restabelecer o equilíbrio do sistema e, consequentemente, o controle de

frequência. Dado a sua característica proporcional, o regulador primário não corrige erros em regime permanente. Na ocorrência de uma perturbação no Sistemas de Energia Elétrica (SEE), a regulação primária associada a controles primários de potência ativa atua imediatamente nos primeiros segundos reduzindo as oscilações de frequência dos geradores, como ilustrado na Figura 10.

Figura 10 – Regulação inercial e regulação primária.

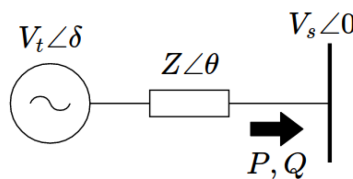


Fonte: (RÊGO, 2017).

Voltando para a temática de MR, com controle primário utilizando o *droop*, no momento que a carga demanda um aumento da potência ativa, a frequência no sistema é afetada tendo o efeito de ser diminuída. E quando há a necessidade de aumento da potência reativa o módulo da tensão é afetado, apresentando também uma diminuição. De fato surge a necessidade de sistemas de controle que atuem constantemente para recuperar o equilíbrio na dinâmica das MRs. As malhas de controle de frequência primário e secundário são projetadas com o objetivo de corrigir desvios de frequência causados por desbalanços de potência.

O método *droop* pode ser explicado com base no sistema da Figura 11. Na modelagem do inversor pode ser utilizado o modelo equivalente como uma fonte de tensão CA, desconsiderando os efeitos do chaveamento de alta frequência do conversor, com tensão terminal $V_t \angle \delta$ e conectado à uma barra CA de tensão $V_s \angle 0$. A impedância de saída do conversor e a impedância da linha são somadas em uma única impedância $Z \angle \theta$.

Figura 11 – Modelo simplificado de um inversor conectado à uma barra CA.



Fonte: Adaptado de (GUERRERO et al., 2004; PLANAS et al., 2013).

O equacionamento da potência ativa e reativa que fluem do conversor para a barra CA são apresentados em (GUERRERO et al., 2004), conforme as equações:

$$\begin{cases} P = \frac{V_s V_t}{Z} \cos(\theta - \delta) - \frac{V_s^2}{Z} \cos(\theta) \\ Q = \frac{V_s V_t}{Z} \sin(\theta - \delta) - \frac{V_s^2}{Z} \sin(\theta) \end{cases} \quad (1)$$

Ao considerar a impedância Z puramente indutiva, devido à alta impedância indutiva das linhas e do filtro altamente indutivo na saída do inversor, então $\theta = 90^\circ$ e a Equação 1 se reduz a:

$$\begin{cases} P = \frac{V_s V_t}{Z} \sin(\delta) \\ Q = \frac{V_s V_t \cos(\delta) - V_s^2}{Z} \end{cases} \quad (2)$$

Para pequenas diferenças angulares entre a tensão V_t do terminal do conversor e a tensão V_s da barra CA, é considerado $\sin(\delta) \approx \delta$ e $\cos(\delta) \approx 1$, simplificando a Equação 2 para:

$$\begin{cases} P = \frac{V_s V_t}{Z} \delta \\ Q = \frac{V_s (V_t - V_s)}{Z} \end{cases} \quad (3)$$

Com base na Equação 3, a potência ativa injetada pelo inversor na barra é proporcional à diferença angular das tensões V_t e V_s e que a potência reativa trocada entre o inversor e a barra é proporcional a diferença de amplitude da tensão entre V_t e V_s . Além disso, o ângulo da tensão V_t do inversor pode ser alterado por uma variação na frequência da tensão V_t (BORUP; BLAABJERG; ENJETI, 2001; BIDRAM; DAVOUDI, 2012; TAYAB et al., 2017).

Desta forma, aplica-se a relação de *droop* de potência ativa por frequência e de potência reativa por módulo da tensão, para controle do inverso, como apresentadas:

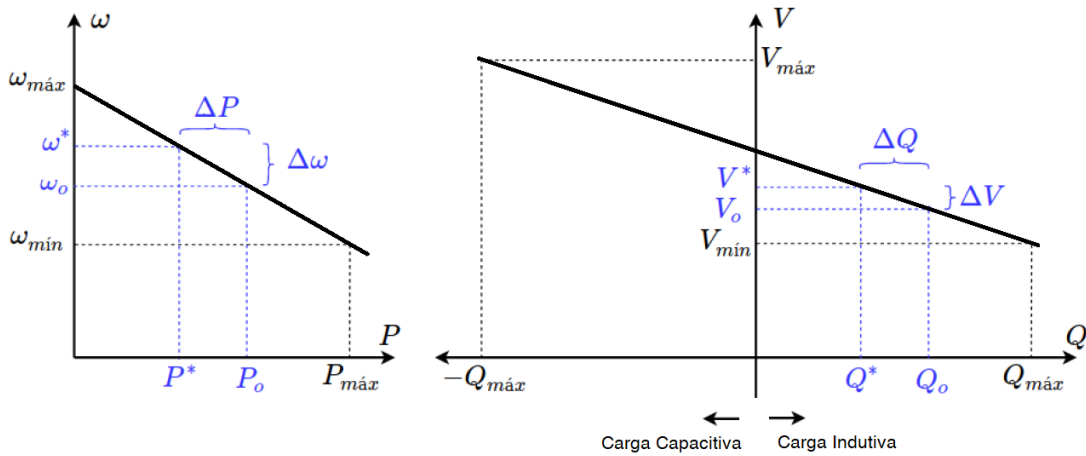
$$\omega_0 = \omega^* - G_P(s)(P_0 - P^*) \quad (4)$$

$$V_0 = V^* - G_Q(s)(Q_0 - Q^*) \quad (5)$$

Os valores de P e Q são as referências de potência ativa e reativa para o ponto de operação nos valores nominais de frequência angular (ω) e tensão (V); Os de P_0 e Q_0 as potências ativas e reativas calculadas a partir da tensão e corrente medidas na saída do inversor; As funções de transferência do controle *droop* dados por $G_P(s)$ e $G_Q(s)$, sendo normalmente ganhos proporcionais $G_P(s) = m$ e $G_Q(s) = n$; por fim, a frequência angular (ω_0) e amplitude da tensão (V_0) de referência a ser fornecida para os controladores internos.

Para manter o sistema sincronizado dentro dos limites estáveis de tensão, usa-se os controladores proporcionais m e n para fornecer desvios constantes. A Figura 12 mostra as relações das Equações 4 e 5 para as funções de transferência $G_P(s) = m$ e $G_Q(s) = n$. Salienta-se que uma variação ΔP na potência ativa fornecida pelo inversor provoca um desvio $\Delta\omega$ na frequência e que uma variação ΔQ na potência reativa fornecida pelo inversor provoca um desvio ΔV na amplitude de tensão.

Figura 12 – Funções do controle *droop* P e Q.



Fonte: Adaptado de (GUERRERO et al., 2004; PLANAS et al., 2013).

A inclinação da reta do *droop* são dadas pelos ganhos m e n e estes valores são ajustados a partir das potências ativa e reativa nominais e nos máximos desvios permitidos para a amplitude e frequência angular da tensão, que são dados pelas equações:

$$m = \frac{\omega_{m\acute{a}x} - \omega_{m\acute{i}n}}{P_{m\acute{a}x}} \quad (6)$$

$$n = \frac{V_{m\acute{a}x} - V_{m\acute{i}n}}{2Q_{m\acute{a}x}} \quad (7)$$

Algumas desvantagens na utilização do *droop* são descritas em (LI; KAO, 2009; BIDRAM; DAVOUDI, 2012; TAYAB et al., 2017) e enumeradas a seguir:

1. Há dependência entre a regulação de frequência e tensão e o compartilhamento de potência, necessitando assim uma etapa de ajuste entre ambas;
2. Diferentemente da frequência, a amplitude da tensão não é uma grandeza global na MR. Porém, as diferenças de impedâncias das linhas e das impedâncias de saída dos GDs afetam significativamente o compartilhamento de potência reativa diante das diferentes variações de tensões;
3. A precisão do compartilhamento de potência reativa é afetada se houver cargas locais na saída do GD;
4. Inadequação no compartilhamento da potência consumida por correntes harmônicas no caso de haver cargas não-lineares;
5. Resposta transitória lenta;
6. Conforme a Equação 3, o desenvolvimento do método presume linhas predominantemente indutivas. Porém, em redes de distribuição, as linhas são predominantemente resistivas, acarretando a baixas relações X/R na rede, provocando um acoplamento entre potência ativa e reativa. Este acoplamento afeta o compartilhamento correto da potência ativa e, principalmente, reativa entre os inversores e pode comprometer o comportamento transitório e a estabilidade da MR.

Diante das desvantagens apresentadas, na literatura, têm sido discutidas algumas alternativas de melhorias na implementação convencional do *droop*. No entanto, varias técnicas de controle *droop* foram desenvolvidas para aplicação em MRs. Em (GUERRERO et al., 2007; SAO; LEHN, 2008) é apresentado um controle *droop* resistivo, onde a variação de tensão é proporcional a variação da potência ativa e a variação de frequência é proporcional ao oposto da variação da potência reativa. Já em (BRABANDERE et al., 2007; VASQUEZ et al., 2009) expõe uma matriz rotacional, em que as variações de potência ativa e reativa afetam – através de uma proporção angular – as variações de frequência e tensão simultaneamente. E nos trabalhos de (BIDRAM; DAVOUDI, 2012; TAYAB et al., 2017) é observado uma análise de diferentes métodos propostos, dentre os quais se destaca o *droop* com impedância virtual.

O método da impedância virtual tem o objetivo melhorar a resposta transitória e diminuir o acoplamento de potência ativa e reativa através da implementação virtual da impedância nos terminais do inversor (GUERRERO et al., 2004; LI; KAO, 2009; GUERRERO et al., 2010).

Ao se projetar e implementar de forma adequada, o uso da impedância virtual pode melhorar consideravelmente a performance do compartilhamento e controle de potência dos inversores. Entretanto, um projeto ou implementação inadequado pode gerar distorções na corrente do inversor e conseqüentemente afetar a estabilidade e dinâmica da MR (HE; LI, 2011). Em (BIDRAM; DAVOUDI, 2012) é mostra que para simular o efeito de uma impedância, o

controle utiliza uma realimentação da corrente de saída do inversor(i_0) para calcular uma queda de tensão virtual sobre uma impedância (Z_v), subtraindo o resultado da tensão de referência v_0 gerada pelo controle *droop*, como visto na Equação 8:

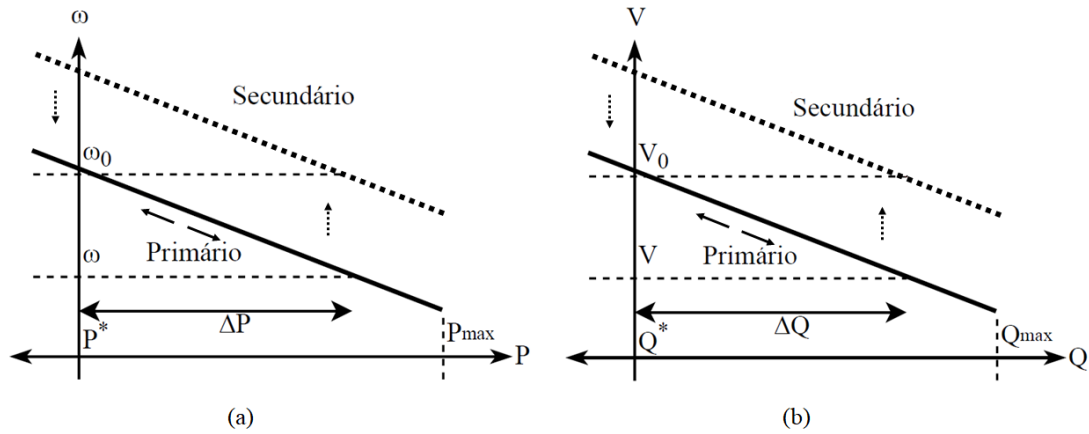
$$v_{ref} = v_0 - Z_v(s)i_0 \quad (8)$$

A impedância pode assumir valores de resistência e reatância indutiva ou capacitiva. Como o objetivo normalmente é aumentar a indutância da rede vista pelo inversor, com a finalidade de superar as desvantagens do método *droop* geradas pelas baixas relações X/R , a impedância virtual é particularmente utilizada como uma indutância, suficientemente maior que a impedância da linha para chegar em valores de baixa relação X/R (TAYAB et al., 2017).

2.10.2 Controle Secundário

No nível de controle secundário há um CCMR que tem como função compensar os desvios de frequência e tensão causados pelo controle primário e restabelecer seus valores nominais, além de enviar o valor desejado de potência *set point* ativa e reativa para as microfones despacháveis. O CCMR pode estabelecer comunicação com o Operador da Rede de Distribuição (ORD), que permitirá melhoria no gerenciamento e operação da microrrede (KAUR; KAUSHAL; BASAK, 2016; WANG et al., 2012).

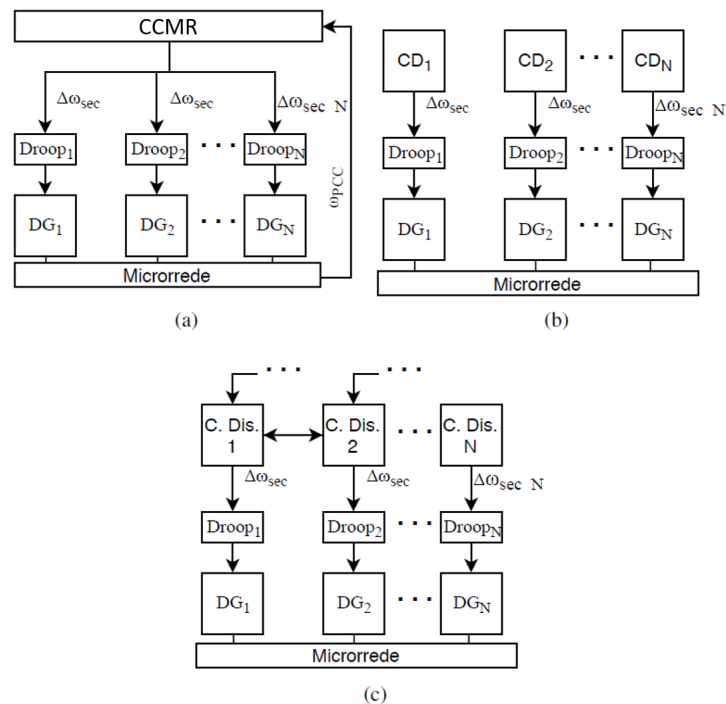
Uma das ações do controle secundário é modificar as referências de frequência (ω^*) e tensão (V^*) nos controladores *droop* de cada GD, através das referências $\Delta\omega_{sec}$ e ΔV_{sec} (GUERRERO et al., 2010; BIDRAM; DAVOUDI, 2012; GUERRERO et al., 2013). A atuação do controle secundário no controle primário, pode ser vista na Figura 13, no qual após ação do controle, a frequência e tensão atingem valores distintos dos nominais. Assim, o controle secundário desloca as referências de frequência (ω^*) e tensão (V^*), mantendo as inclinações dos *droops* de frequência e tensão, e elevando os valores os fazendo operar a níveis adequados para o sistema (GUERRERO et al., 2013).

Figura 13 – Ação do controle secundário sobre as curvas de *droop* em MRs. (a) f/P . (b) V/Q .

Fonte: Adaptado de (GUERRERO et al., 2013).

Há uma grande diversidade desenvolvida de técnicas de controle secundário, porém (PLANAS et al., 2013; XU et al., 2018) basicamente classificam em três categorias:

Figura 14 – Topologias de controles secundários em MR. (a) Centralizada. (b) Descentralizada. (c) Distribuída.



Fonte: Adaptado de (PLANAS et al., 2013; XU et al., 2018) .

As três principais abordagens são o controle centralizado, descentralizado e distribuído. As estruturas tradicionais utilizam os modelos centralizados que requerem uma rede de comunicação complexa e, em grande parte dos casos, os canais de comunicação são bidirecionais, o que pode comprometer a confiabilidade do sistema. O controle é realizado através de uma única entidade de controle denominada CCMR, e são capazes de convergir rapidamente para

uma resposta coordenada (PLANAS et al., 2013; XU et al., 2018), como mostrado na Figura 14 (a). Já o controle descentralizado, realizado através de várias entidades de controle Figura 14 (b). Cada controlador utiliza apenas informações locais para tomada de decisões, sem a comunicação com os demais controladores. Alternativamente, as estruturas de controle distribuídas, com redes de comunicação mais dispersas, em que cada controlador utiliza as informações locais e as informações de alguns de seus vizinhos para tomada de decisões Figura 14 (c) – como os sistemas multiagentes, vem tornando aderentes ao controle secundário em MRs.

Diante das possibilidades de qual estratégia escolher, alguns pontos precisam ser analisados, como: características da MR, requisitos de confiabilidade, precisão, tempo de resposta e outras especificações desejadas para o controle. Segundo (PLANAS et al., 2013), para MRs de pequenas escalas as estratégias de controle centralizadas são efetivas, ou nas condições que os proprietários dos RED apresentam os mesmos objetivos, facilitando assim a tomada de decisões de forma coordenada do compartilhamento de potência, redução de perdas, ou até mesmo estabelecer o sincronismo. Ainda assim, em MRs de larga escalas, as estratégias de controle descentralizadas e distribuídas são efetivas, assim, ao considerar um agrupamento de RED, a aplicação do controle centralizado é inviável devido ao elevado volume de dados a serem processados, acarretando altos investimentos em processadores e sistemas de comunicação; ou até mesmo na condição de objetivos distintos entre proprietários.

Embora o controle secundário seja tradicionalmente implementado com base em um CCMR, a arquitetura de controle distribuído baseada em Sistemas Multiagentes(SMA) tem sido relevante, devido a alguns benefícios da sua aplicabilidade, como tolerância a falhas; menor demanda dos canais de comunicação; além de flexibilidade e eficiência computacional. Isso porque, a tecnologia dos SMA, permite a distribuição da “inteligência” do controle, garantindo autonomia a controladores locais, com capacidade de tomar suas próprias decisões (VANDOORN et al., 2013). Outro ponto relevante do controle distribuído, é garantir maior confiabilidade diante das estratégias centralizadas em razão de não concentrar as informações e a comunicação em uma única unidade de controle (PLANAS et al., 2013; GUERRERO et al., 2013; BIDRAM et al., 2013; HAN et al., 2017b).

2.10.3 Controle Terciário

Considerado o nível mais alto com a presença do ORD e Operador de Mercado (OM), ambos possuem responsabilidades gerencial da rede de distribuição em média tensão, onde existir mais de uma microrrede presente na rede elétrica (EID et al., 2014). Realiza a coordenação de múltiplas MRs interagindo entre si e com o sistema principal. A principal função do controle terciário é gerenciamento do fluxo de potência entre a rede principal e as MRs, otimizando os valores de acordo com os requisitos entre elas. Para isto, são considerados inclusive aspectos econômicos na operação. Além disso, considera-se a etapa final de controle da MR e que possui a dinâmica mais lenta na estrutura de controle hierárquico.

A técnica de controle terciário, é responsável por otimizar o despacho econômico da MR, quando ilhada ou conectada, também consiste na atualização dos valores de referência de frequência e amplitude da tensão do controle secundário de acordo com a potência requerida pelo sistema de distribuição, em operação conectada à rede elétrica. Esse controle atua sobre o controle secundário e primário, e apresenta uma resposta muito mais lenta que os demais níveis hierárquicos (GUERRERO et al., 2010).

Em resumo, as ações do controle primário, secundário e terciário não são limitadas somente na geração, além disso o controle de demanda também pode ser aplicado nas estratégias, como apresentadas em (LOPES; MOREIRA; MADUREIRA, 2006; GAO et al., 2016; ZHOU et al., 2018; BAKAR et al., 2017). No controle primário, as cargas são aliviadas caso a frequência ou a tensão atinjam valores críticos, à manter a estabilidade do sistema. Para o controle secundário, as cargas podem sofrer alívio para auxiliar a regulação de frequência e tensão. Por fim, no controle terciário, há um corte das cargas para que as GDs e os SAE possam, posteriormente, atender as cargas prioritárias em maior tempo de atuação.

A tese tem como parte fundamental a operação do controle primário e secundário da MR, estando fora do escopo do trabalho o controle terciário, sendo considerado inexistente na MR analisada.

2.11 Conclusão do capítulo

O capítulo descreveu as MRs, apresentando um conceito definido e suas principais características e modos de operações abordadas. A estrutura típica de uma MR foi mostrada junto a uma descrição de cada um dos elementos que a compõem. A partir desta afirmação, verifica-se que as MRs têm o potencial de integrar os RED ao sistema de potência de forma a fornecer maior eficiência no aproveitamento das fontes de energia primária e no uso do sistema de distribuição.

Com o objetivo de investigar as normas existentes referentes à conexão de MR, nacionais e internacionais, nesta tese foram apresentados os aspectos relevantes associados a integração das tecnologias e recursos energéticos presentes em MR aos sistemas elétricos convencionais. Realizando assim, uma vasta revisão bibliográfica. Normas e padrões referentes a conexão de geração distribuída também foram consideradas, visto que, dentro de uma MR, prevalece o uso desse tipo de geração.

Os modos de operação se mostraram relevantes, pois a partir deles serão tomadas as decisões de operar ilhada possibilitando manter o fornecimento de energia na ocorrência de falhas no sistema elétrico principal ou outros tipos de operações. O conceito de controle hierárquico para MR apresentado se mostrou fundamental na decisão para a escolha de qual seria utilizado na tese, considerando inclusive aspectos para estabilizar a frequência operando em modo ilhado e permitir a operação em paralelo dos diversos RED.

3 MODELOS DOS RED

A fim de realizar os estudos e simulações da MR, é fundamental representar adequadamente os modelos elétricos dos RED associados aos conversores eletrônicos, sistemas de controle e fontes primárias. Neste capítulo, são descritos os modelos utilizados para representar os RED dos tipos de sistemas de armazenamento de energia em baterias e sistemas fotovoltaicos.

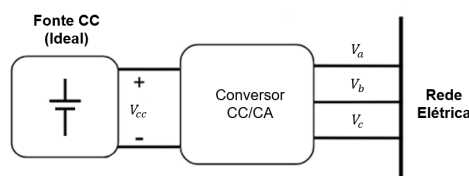
Na Seção 3.1 são definidos os modelos dos conversores CC/CA que conectam os RED à rede elétrica CA. Na Seção 3.2 são detalhados os sistemas eletrônicos de conversão de potência CC/CA utilizados pelos RED e são apresentados os modelos do conversor eletrônico de potência, o sistema de controle por corrente e por tensão, o controle interno proposto na tese e os modos de operação dos conversores.

A Seção 3.3 é dedicada aos modelos elétricos das fontes primárias dos RED (baterias e fotovoltaicos), dos circuitos de controle de conversão CC/CC, bem como a descrição das características técnicas. Os modelos, em conjunto com os apresentados na Seção 3.2 resultam o modelo completo dos RED do tipo BESS e FV utilizados na tese. Nas Seções 3.3.2 e 3.3.1, os modelos dos RED serão explorados diante da utilização do conversor CC/CA, através do VSC (*Voltage-Sourced Converter*), obtendo-se assim os modelos para o sistema fotovoltaico e sistema de armazenamento na energia em baterias, respectivamente.

3.1 Introdução

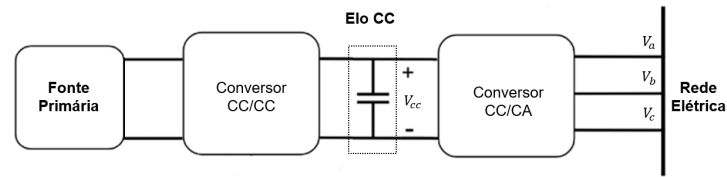
Para o estudo e simulação da MR são necessários modelos elétricos dos RED que abrangem os respectivos conversores eletrônicos associados aos sistemas de controle e as fontes primárias. Adicionalmente, serão apresentados duas topologias básicas para o modelo dos RED da MR. A Figura 15 mostra a fonte primária e o circuito CC que são representados por uma fonte de tensão CC ideal conectada diretamente ao sistema de conversão de potência CC/CA fazendo interface com a rede. Na Figura 16, o modelo mais completo dos RED, utiliza a fonte primária, o link CC e os sistemas de conversão CC/CC e CC/CA.

Figura 15 – Topologia do RED com fonte primária ideal.



Fonte: Adaptado de (YAZDAMI; IRAVANI, 2010)

Figura 16 – Topologia do RED com modelo completo do lado CC.



Fonte: Adaptado de (BAZARGAN; BAHRANI; FILIZADEH, 2018)

3.2 Sistema de conversão de potência CC/CA

Segundo (YAZDAMI; IRAVANI, 2010), um sistema eletrônico de conversão de potência pode ser considerado como uma composição de um ou mais conversores eletrônicos de potência e dos respectivos sistemas de controle e proteção. A seguir serão descritos de forma sucinta os conversores eletrônicos de potência e os sistemas de controle utilizados para modelagem da microrrede proposta no *Matlab/Simulink*.

3.2.1 Conversor CC/CA

A principal função dos conversores CC/CA é permitir realizar a troca de energia entre dois ou mais subsistemas que têm atributos diferentes em termos de formas de onda de tensão e corrente, ângulo de fase e número de fases, frequência e, portanto, não podem ser diretamente conectados entre si (YAZDAMI; IRAVANI, 2010).

A classificação desses conversores partem da premissa que a fonte de energia conectada ao lado CC se comporta como uma fonte de corrente. A corrente CC de mesma polaridade e tensão CC de polaridade variável dependendo da direção do fluxo de potência e são classificados como CSC (*Current Sourced Converter*). Já os conversores que sua conexão do link CC se comporta como uma fonte de tensão, ou seja, tensão CC de mesma polaridade e corrente CC de polaridade variável dependendo da direção do fluxo de potência, são denominados de VSC (*Voltage-Sourced Converter*) (YAZDAMI; IRAVANI, 2010).

OS VSCs são amplamente utilizados em sistemas de geração distribuída por não necessitarem de fontes externas para manter o sincronismo, e também possibilitar fornecer suporte à rede e garantir os requisitos de *ride-through* (BIDRAM et al., 2013; GUERRERO et al., 2010). Este conversor possui comutação forçada, na qual a transferência de corrente entre as chaves é um processo controlado e requer chaves de condução reversa, que normalmente utilizam os transistores IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) (YAZDAMI; IRAVANI, 2010). Além disso, o modelo do VSC pode considerar os efeitos de comutação das chaves eletrônicas, usando o modelo chaveado ou desconsiderá-lo, utilizando o modelo de valores médios.

Ao analisar o modelo chaveado - que representa a dinâmica das chaves eletrônicas por meio de uma chave ideal - a componente fundamental da tensão do lado CA é geralmente

controlado por PWM (*Pulse Width Modulation*) que recebe o sinal de controle enviado para as chaves formada pela multiplicação do sinal de modulação – sinal gerado pelos controles do conversor – com um sinal de portadora de alta frequência. Por outro lado, o modelo de valores médios desconsidera a dinâmica de alta frequência do processo de chaveamento e com isso o VSC é considerado uma fonte de tensão ideal. Portanto, o modelo de valores médios não necessita de um PWM, utilizando assim apenas o sinal de modulação. De acordo com (YAZDAMI; IRAVANI, 2010), no modelo de valores médio as tensões terminais do VSC são dadas por:

$$v_{ta} = m_a \cdot \frac{V_{cc}}{2} \quad (9)$$

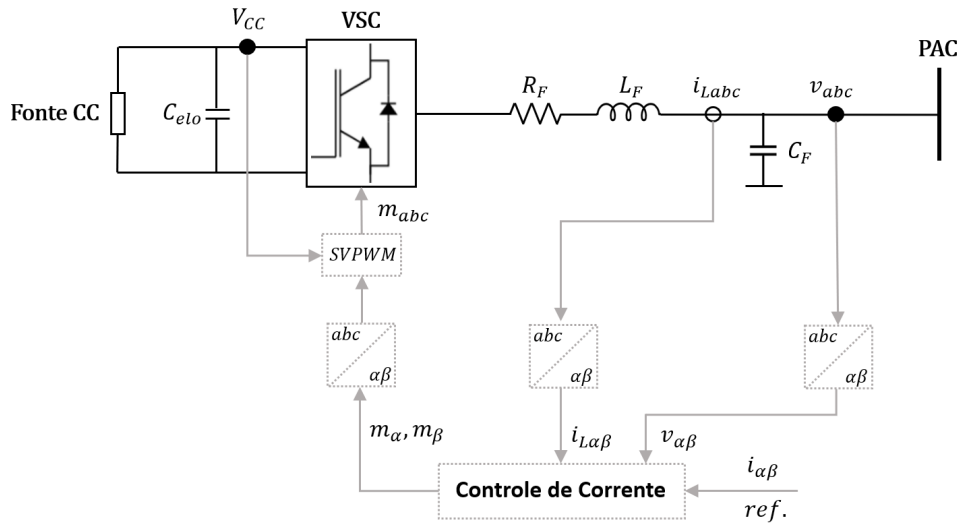
$$v_{tb} = m_b \cdot \frac{V_{cc}}{2} \quad (10)$$

$$v_{tc} = m_c \cdot \frac{V_{cc}}{2} \quad (11)$$

onde m_a , m_b e m_c são os sinais de modulação trifásicos gerados pelos controles do conversor.

3.2.2 VSC controlado por corrente

O sistema de controle de corrente do VSC está representado na Figura 17, em que as grandezas utilizadas para realizar o controle estão implementadas no referencial estacionário $\alpha\beta$. O VSC controlado por corrente apresenta apenas um loop de controle, de forma que as correntes de referências são obtidas a partir de um controlador de energia que pode estar/ser associado a um controle de energia de uma fonte primária (por exemplo, rastreamento de máxima potência), ou para aplicações que o controlador tenha o objetivo de manter determinada grandeza do sistema de conversão fixa (por exemplo, controle da tensão do barramento CC) (YAZDANI; IRAVANI, 2010).

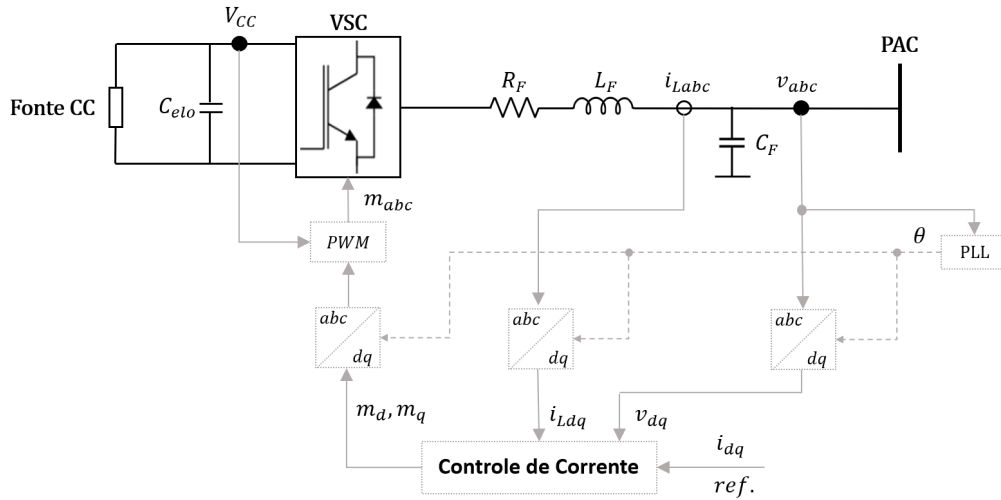
Figura 17 – Controle de corrente em referencial $\alpha\beta$.

Fonte: Próprio autor

A transformação das grandezas trifásicas (referencial natural) para o referencial estacionário $\alpha\beta$ é realizada através dos blocos $(abc - \alpha\beta)$, que representa a matriz de transformação da equação:

$$\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (12)$$

Além do referencial estacionário $\alpha\beta$, o controle de corrente pode ser implementado no referencial síncrono dq , conforme Figura 18. As correntes referencias para o controle no *frame* dq podem ser geradas de uma forma semelhante ao que foi citado no referencial $\alpha\beta$.

Figura 18 – Controle de corrente em referencial dq .

Fonte: Próprio autor

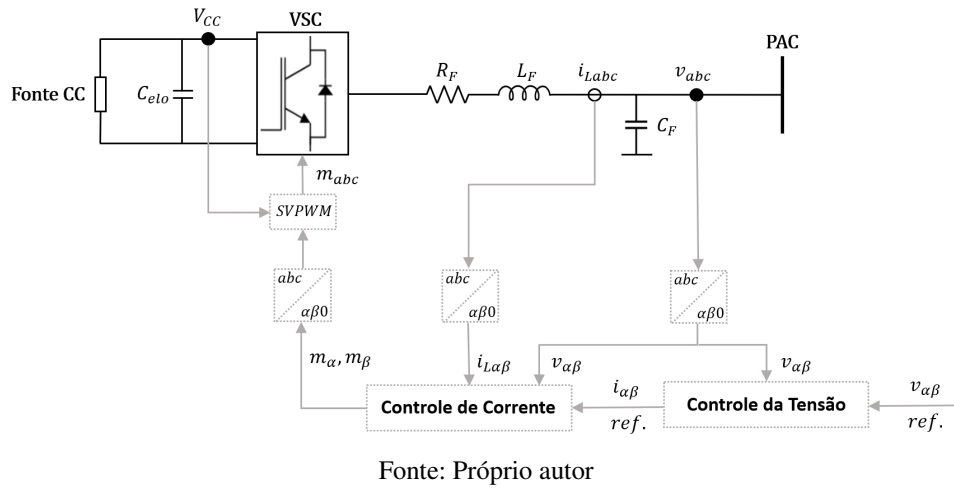
As grandezas trifásicas (referencial natural) são transformadas em grandezas no referencial síncrono dq por meio dos blocos $(\alpha\beta - dq)$, que representa a matriz de transformação apresentada na equação:

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} \quad (13)$$

Para realizar a estratégia de controle do VSC no referencial dq é necessário utilizar técnicas de sincronização, que tem como objetivo estimar os parâmetros de tensão da rede elétrica, determinando o modo de operação mais apropriado do conversor. Existem diversos mecanismos de sincronização, dentre eles, o PLL (*phase-locked loop*). Os diferentes tipos de PLLs podem ser implementados a partir de três estruturas básicas: (1) detector de fase - analisa o erro de fase entre o sinal de entrada e o sinal de saída; (2) filtro de *loop* - minimizar o erro de fase e gerar o sinal de referência para o oscilador e; (3) um oscilador controlado por tensão - gera o sinal de saída (ROCABERT et al., 2012).

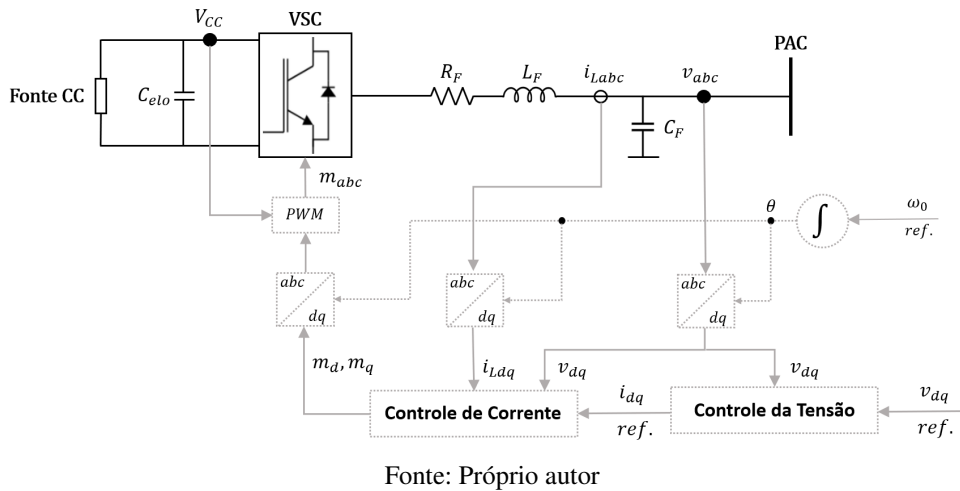
3.2.3 VSC controlado por tensão

A Figura 19 apresenta o controle de tensão para o VSC no referencial estacionário $\alpha\beta$. O VSC controlado por tensão apresenta dois laços de controle concatenados (em cascata), composto por um laço interno de corrente e um laço externo de tensão.

Figura 19 – Topologia VSC controlado em tensão no referencial $\alpha\beta$.

O laço externo recebe os valores referência de magnitude de tensão externa para controlar a magnitude da tensão de saída do VSC. Por sua vez, o controle de tensão gera as correntes de referência para o controle de corrente, que calcula a referência do sinal de modulação (m) para o VSC. Os blocos $(abc - \alpha\beta)$ apresentam a mesma funcionalidade do VSC controlado por corrente.

Semelhante ao controle de corrente do VSC, a Figura 20 mostra o controle de tensão no referencial síncrono dq . Diferentemente do VSC controlado por corrente, o VSC controlado por tensão não utiliza um PLL, mas necessita de uma referência angular para formar a tensão de saída. A referência angular é integrada ao longo do tempo a posição angular θ é utilizada para os blocos de transformações $(abc - dq)$ (YAZDANI; IRAVANI, 2010).

Figura 20 – Topologia VSC controlado em tensão no referencial dq .

3.2.4 Controles internos

As estratégias de controle de tensão e corrente são denominadas controles internos presentes na estrutura controle, porém em alguns trabalhos presentes na literatura, o controle interno não é considerado como parte do controle hierárquico da MR. Para a tese, o controle interno será definido apenas com a malha de controle de corrente.

O controle de corrente pode ser implementado no referencial estacionário $\alpha\beta$ ou no referencial síncrono dq . Cada referencial apresenta vantagens e desvantagens; no referencial $\alpha\beta$ o controle é realizado com base em dois sistemas (sistema de coordenadas ab) onde é possível controlar separadamente as potências ativa e reativa, além disso, não há necessidade de um sistema de sincronização quando comparado ao controle do referencial dq .

Já o controle implementado no referencial dq é capaz de fornecer as mesmas funcionalidades do controle no referencial $\alpha\beta$, porém apresenta uma vantagem associada em regime permanente, onde as variáveis de controle passam a ter valores contínuos. Essa vantagem possibilita empregar o controlador PI (Proporcional-Integral) com as variáveis de controle no referencial dq (ALMEIDA, 2019; CARVALHO et al., 2019).

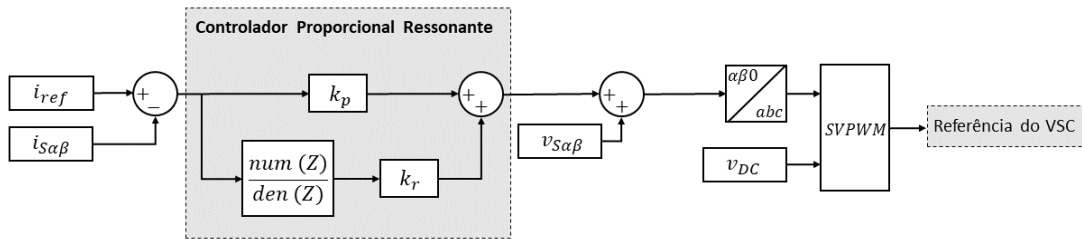
O controlador PI é comumente empregado nas estratégias de controle interno para inversores trifásicos conectados à MR, devido a sua simplicidade, robustez, baixo custo computacional, alternativa de implementação analógica e rejeita distúrbios estáticos presentes na planta. Para que essas características citadas sejam atendidas, o controlador PI deve ser implementado em referencial síncrono dq (CARVALHO et al., 2019).

Outro controlador bastante utilizado e que pode substituir o controlador PI é o compensador Proporcional-Ressonante (PR), por permitir um bom desempenho para o controle de grandezas senoidais. O compensador PR apresenta um ganho muito elevado em determinado valor de frequência, ganho proporcional pequeno (todas a faixa de frequência) e largura de banda estreita, tendo potencial para ser implementado no referencial estacionário $\alpha\beta$ (CARNIELETTO et al., 2009). A Equação 14 representa a função transferência para o controlador PR (HOJABRI et al., 2012).

$$G(s) = K_p + \frac{K_r s}{s^2 + \omega^2} \quad (14)$$

Onde ω , K_p e K_r são: frequência de ressonância, ganho proporcional e integrativo, respectivamente. Nesse trabalho, será utilizado as variáveis de controle no referencial $\alpha\beta$, evitando as transformações dq e o mecanismo de sincronização, como há uma redução no esforço computacional junto ao controlador PR, conforme Figura 21.

Figura 21 – Diagrama de bloco do controle de corrente do VSC.



Fonte: Próprio autor

De acordo com a Figura 21, corrente de referência i_{ref} é gerada por uma malha de controle externa, a qual define a potência que a fonte CC (PV e BESS) irá absorver e/ou injetar. A corrente $i_{s\alpha\beta}$ representa corrente na saída do VSC. As grandezas $v_{s\alpha\beta}$ e v_{DC} representam a tensão na saída do VSC (ou no terminal do gerador) e a tensão do link CC, respectivamente. Os valores de K_p e K_r do controlador PR foram obtidas empiricamente.

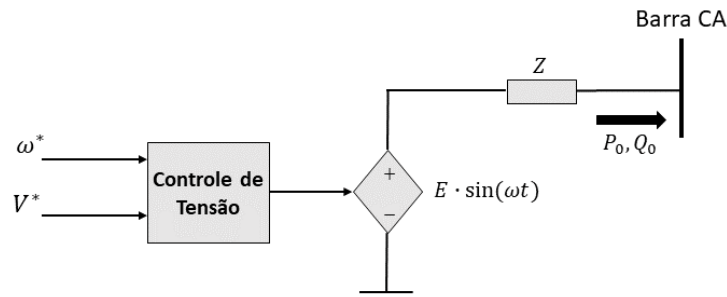
O bloco SVPWM (*Space Vector Pulse Width Modulation*) representa a implementação da técnica de modulação para as tensões do conversor e as tensões de referência como vetores em sistema de coordenadas tridimensional. O vetor tensão rotativo (espacial) pode ser obtido no referencial natural abc considerando o somatório das tensões de cada fase. O SVPWM mostra-se como uma boa alternativa de técnica de modulação, pois apresenta uma alta eficiência de tensão CC, frequência de comutação constante e flexibilidade com diversos tipos de controle (ZENG et al., 2013; ROJAS et al., 2022; ZHANG et al., 2009).

3.2.5 Modos de operação do conversor CC/CA

Dependendo do modo de operação da MR, a estratégia para controle dos conversores pode ser proposta para atender objetivos distintos, como controlar tensão e frequência – controle de potência ativa e reativa. Assim, operando no modo ilhado ou conectado à rede, além da natureza das fontes, despacháveis ou não despacháveis, podem ser definidos três modos de operação para os conversores de potência da MR: *grid-forming*, *grid-feeding* e *grid-supporting*.

Grid-forming

Os conversores *grid-forming* ou formadores de rede, definem a amplitude da tensão (V^*) e frequência (f^*) da rede a qual está conectada, podendo ser representados como uma fonte de tensão CA ideal com baixa impedância de saída, conforme a Figura 22.

Figura 22 – Modelo elétrico do modo de operação *grid-forming*.

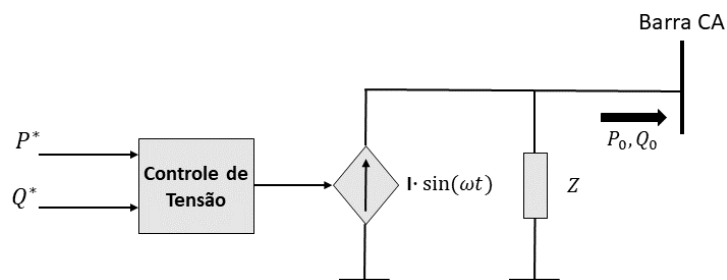
Fonte: Próprio autor

O modo de operação *grid-forming* é utilizado quando a MR opera em modo ilhado, pois no modo conectada a amplitude e a frequência são definidas com base na rede elétrica principal. Para operar vários conversores formadores de rede em paralelo é necessário um sistema de sincronização preciso, permitindo o compartilhamento de potência entre os conversores, que está relacionado com o valor de suas impedâncias de saída (ROCABERT et al., 2012).

Um tipo de aplicação para o conversor operando do modo *grid-forming* é a UPS. Quando a rede opera em condições normais, a UPS permanece desconectada a rede principal. Caso ocorra alguma falha na rede, a UPS forma a tensão da rede.

Grid-feeding

No modo de operação *grid-feeding*, os conversores de potência são projetados para fornecer potência ativa e reativa para uma rede energizada. Sua representação pode ser definida com uma fonte de corrente ideal controlada e conectada à rede em paralelo com um alto valor de impedância, ilustrado na Figura 23.

Figura 23 – Modelo elétrico do modo de operação *grid-feeding*.

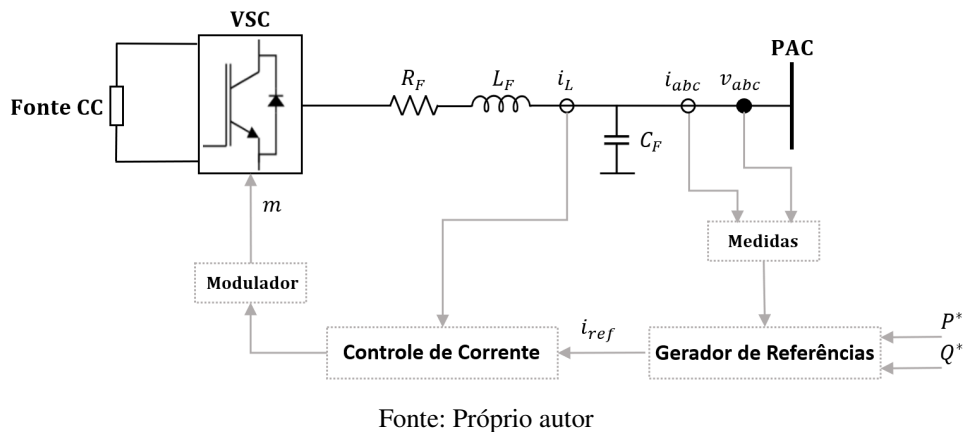
Fonte: Próprio autor

Os valores de (P^*) e (Q^*) são, respectivamente, as potências ativas e reativas fornecidas pela estratégia de controle do sistema. Para este tipo de aplicação, a fonte de corrente deve estar perfeitamente sincronizada com a tensão CA no ponto de conexão, permitindo controlar o(s) fluxo(s) de potências ativa e reativa com a rede.

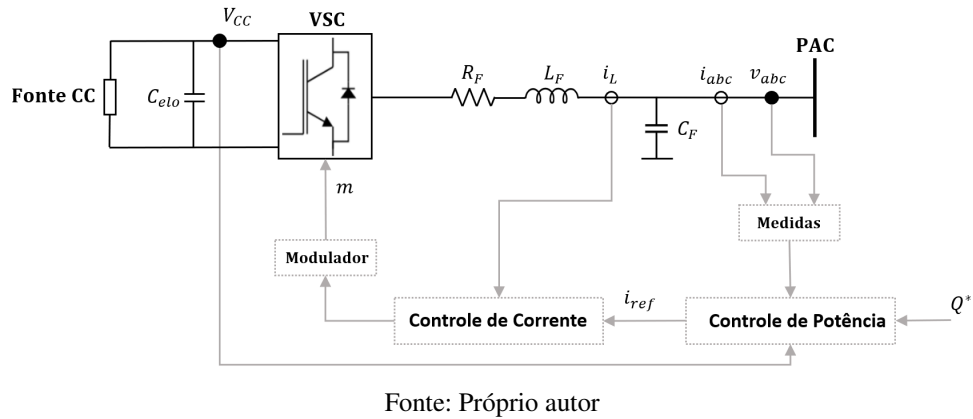
Os conversores operando no modo *grid feeding* não devem atuar de maneira independente quando a MR estiver no modo ilhado, já que necessitam de outro conversor (*grid-forming* ou *grid-supporting*) ou de um gerador síncrono local, definindo a amplitude da tensão e frequência da MR. Esses conversores são capazes de colaborar no controle da amplitude da tensão e frequência da MR a partir do controle que ajusta as referências de potências ativa e reativa (P^*) e (Q^*) a serem fornecidas (ROCABERT et al., 2012).

Comumente, em GD, os conversores utilizados operam no modo *grid-feeding*, como em sistemas de geração solar e eólica. As Figuras 24 e 25 ilustram estruturas de controle típico de conversor operando no modo *grid-feeding* em uma rede CA. A Figura 24 exemplifica a estrutura de controle para fonte de energia despachável, de forma que o VSC é controlado por corrente a partir de correntes de referências geradas para determinar valores desejados de potências ativa e reativa (P^*) e (Q^*), que são fornecidas pelo nível de controle do sistema (ROCABERT et al., 2012).

Figura 24 – Topologia do VSC operando no modo *grid-feeding* com fonte despachável.

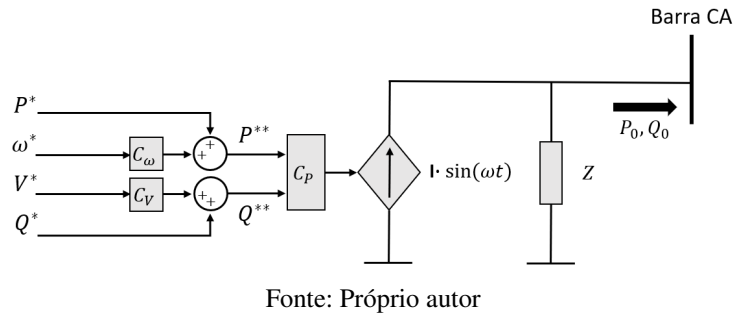
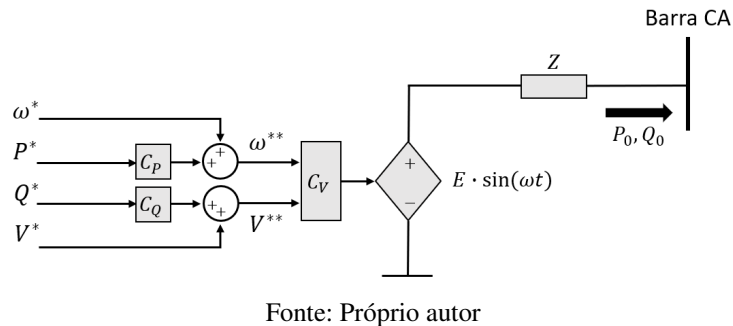


A Figura 25 apresenta a estrutura de controle para uma fonte de energia não despachável, geralmente uma fonte de energia intermitente como um sistema FV. Neste tipo de topologia, o controlador de potência fornece as correntes de referências para o VSC baseado na tensão V_{CC} (tensão do elo CC) e potência reativa (Q^*). A estratégia de controle de potência ativa por meio da tensão V_{CC} tem como objetivo fazer com que o VSC siga a potência fornecida pela fonte primária, fornecendo sua potência para rede. Consequentemente, a fonte primária não poderá ser representada por fonte CC ideal já que não haveria dinâmica da tensão V_{CC} (ROCABERT et al., 2012).

Figura 25 – Topologia do VSC operando no modo *grid-feeding* com fonte não despachável.

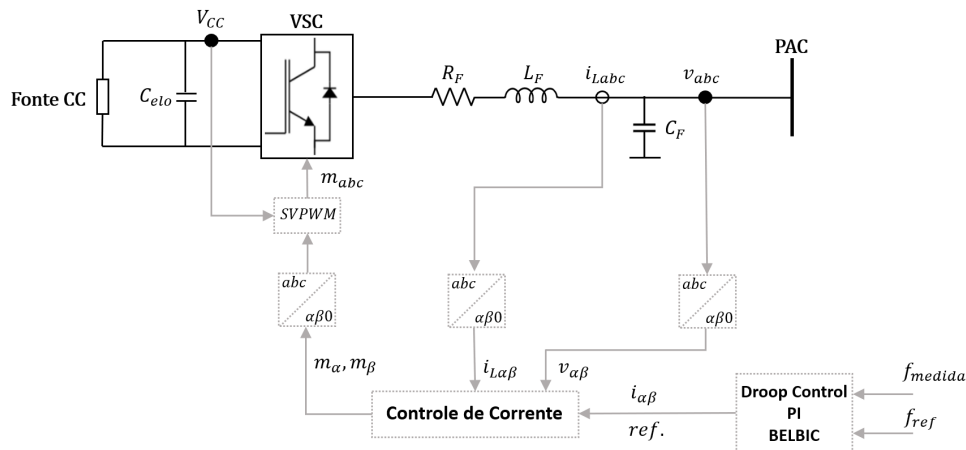
Grid-supporting

No modo de operação *grid-supporting*, os conversores podem ser representados de duas formas, uma como sendo fonte de corrente ideal controlada por corrente em paralelo com uma impedância, ou como uma fonte de tensão CA ideal em série com uma impedância, conforme a Figura 26 e a Figura 27, respectivamente. Nos dois tipos de representação, o objetivo principal é auxiliar na regulação da amplitude da tensão (V^*) e frequência (f^*) da rede CA, controlando a potência ativa e reativa fornecida.

Figura 26 – Modelo elétrico do modo de operação *grid-supporting* controlado por corrente.Figura 27 – Modelo elétrico do modo de operação *grid-supporting* controlado por tensão.

O VSC no modo de operação *grid-supporting* controlado como uma fonte de corrente, apresentado na Figura 28, tem com funcionalidade atender a carga da MR, assim como também deve ser controlado para contribuir na regulação de tensão e frequência da rede CA e da MR. O sistema de controle do VSC que conecta o BESS à MR será implementado com base no modo *grid-supporting*.

Figura 28 – Controle do VSC do BESS.



Fonte: Próprio autor

Nessa tese, a malha de controle de potência ativa, que geram as correntes de referência para o controle de corrente do VSC que conecta o BESS à MR, será implementada por meio três metodologias de controle: *droop control*, controle PI e controle BELBIC.

3.3 Fontes primárias e sistema de conversão CC/CC

Nesta seção são demonstrados os modelos mais completos onde a fonte de tensão ideal é substituída por modelos das fontes primárias e do circuito CC, conforme apresentado anterior na Figura 16. Os modelos utilizados são encontrados na literatura e tem por objetivo representar uma aproximação do comportamento das fontes primárias nas simulações da MR, se comparado à utilização de uma fonte CC ideal.

3.3.1 Modelo do BESS

Os dispositivos armazenadores de energia são similares a qualquer outra fonte baseada em inversores, exceto pelo fluxo de potência bidirecional (LASSETER; ERICKSON, 2009). Dentre as estrutura de armazenamento energético, que pode ser de vários tipos, entre os quais se destacam: Volante de inércia, Banco de baterias (chumbo-carbono, íon de lítio, sulfeto de sódio, etc), Supercapacitores, veículos elétricos etc.

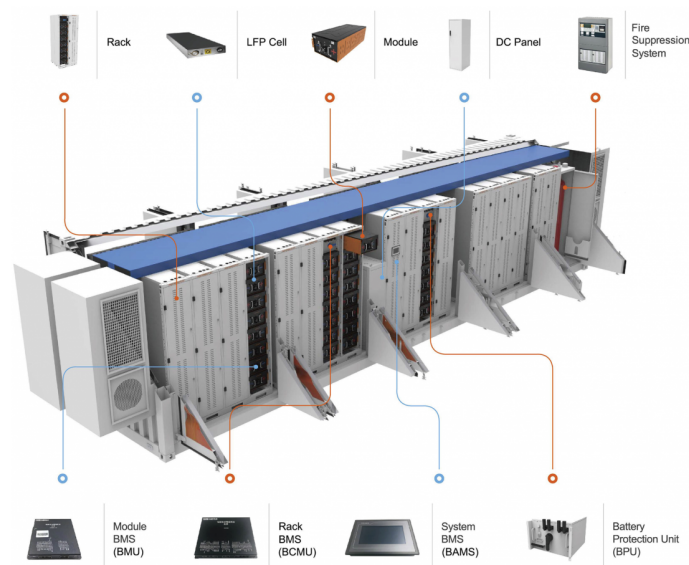
3.3.1.1 Introdução

Os SAE permitem mitigar a variabilidade da produção renovável, reduzindo o risco de instabilidade de frequência em redes isoladas, o que resulta no aumento da integração destas fontes, porém algumas não possuem a capacidade de manter os níveis de tensão e frequência durante distúrbios de operação. No caso específico das redes isoladas, os sistemas de armazenamento podem auxiliar na regulação primária e/ou secundária de frequência, contribuindo para a manutenção da estabilidade de frequência e mantêm a microrrede em operação permitindo que cargas críticas continuem em funcionamento. A rápida variação de potência permitida por alguns sistemas de armazenamento possibilitam a não ocorrência do colapso do sistema e com isso efetuar o suporte à reposição de serviço após ocorrência de uma perturbação. Desta forma, os SAE desempenham um papel fundamental durante essas estratégias, e possibilitando manter o balanço de potência e os níveis de frequência/tensão desejáveis (LAAKSONEN; KAUHANIEMI et al., 2008).

3.3.1.2 Estrutura do BESS

No presente trabalho será abordado a estrutura do sistema de armazenamento de energia em bateria, denominado de BESS. O Sistema é composto por banco de baterias, sistema de gerenciamento de baterias (BMS, do inglês *Battery Monitoring System*), conversor (PCS, do inglês *Power Conversion System*), controle, chaves, fusíveis, equipamentos de medição e sistemas de comunicação. A Figura 29 apresenta um exemplo da solução do sistema de armazenamento em baterias do fabricante Narada (NARADA, 2023).

Figura 29 – Solução BESS Narada.



Fonte: (NARADA, 2023)

Como exemplificado na Figura 29, os bancos de baterias que compõe um sistema de

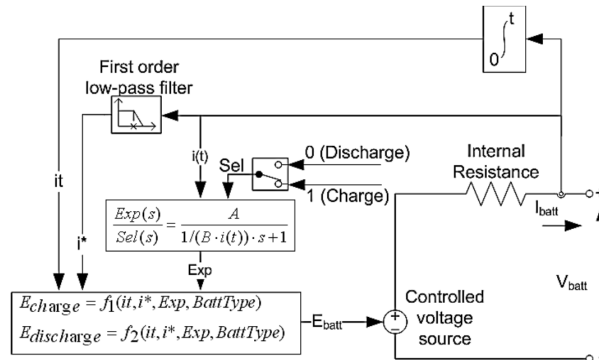
armazenamento são formados por células de baterias individuais em série e/ou em paralelo. De acordo com (BAZARGAN, 2014), um grupo de células de baterias é conectado entre si através de contadores CC para formar bancos de baterias. A função dos contadores CC é desconectar uma bateria do restante na ocorrência de falhas, como por exemplo, sobretensão, afundamento de tensão ou sobrecarga de corrente em uma célula de bateria. Além de fusíveis e sistemas de resfriamento para proteger as baterias de sobrecarga e temperaturas excessivas.

O crescente interesse em tecnologias de armazenamento de energia no suporte à rede é uma realidade hoje. Em particular, sistemas baseados em baterias de lítio evoluíram de forma rápida e com ampla gama de aplicações e características que a diferem dos demais modelos (HESSE et al., 2017). A predileção do emprego do lítio deu-se em virtude de sua estabilidade a longo prazo, alta densidade de energia, custo, segurança e capacidade de carregar e descarregar sem apresentar o efeito de memória (DUNN; KAMATH; TARASCON, 2011).

Acompanhando essa crescente demanda por tecnologias de armazenamento de energia, a modelagem matemática, antes vista como anteparo acadêmico, desempenha hoje um papel importante na elaboração e viabilização de projetos envolvendo acumuladores de energia, como é o caso da utilização no BESS. Nesse contexto, é fundamental a utilização de algum método que seja capaz de prever o tempo de vida das baterias e, à vista disso, seu comportamento dinâmico. É interessante ressaltar que, tempo de vida, vem a ser o tempo em que a bateria atinge um determinado nível inferior de sua capacidade de carga que a impossibilita de fornecer energia para o sistema, distinguindo-se então do conceito de vida útil, que é a quantidade de ciclos de carga e descarga que uma bateria desempenha.

Com esse cenário em vista, diferentes modelos matemáticos de baterias vêm sendo desenvolvidos ao longo dos anos. Dentre eles, destacam-se na literatura os modelos lineares, eletroquímicos, elétricos e analíticos. Portanto, o modelo de bateria utilizado nessa tese é o modelo elétrico *Battery do MATLAB®/Simulink®*, proposto por Tremblay (TREMBLAY; DESSAINT; DEKKICHE, 2007; TREMBLAY; DESSAINT, 2009), que representa baterias recarregáveis (íons de lítio, níquel cádmio, chumbo ácido e níquel metal hidreto). Com esse modelo é possível simular o comportamento de descarga de um tipo específico de bateria definidos pelo cenário proposto no próprio bloco do *Simulink*. Na Figura 30 é ilustrado o diagrama esquemático desse modelo.

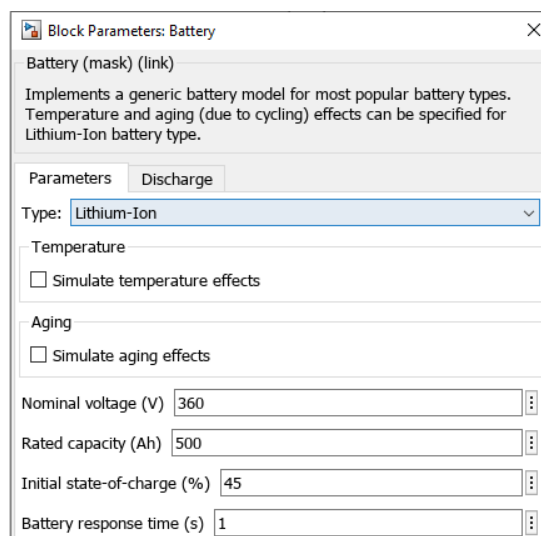
Figura 30 – Diagrama esquemático do modelo Battery do MATLAB®/Simulink®.



Fonte: (MATHWORKS, 2023)

A principal característica de qualquer célula de bateria é a dependência direta entre sua tensão de circuito aberto V_{oc} e seu estado de carga. Geralmente essa relação é obtida experimentalmente e representada por uma curva que depende do tipo da bateria e do processo de carga ou descarga. A princípio deve-se escolher qual o modelo de bateria que será utilizado para condição de operação, nesse trabalho o modelo escolhido foi íons de lítio. Após a escolha da bateria, defini-se os parâmetros de acordo com as condições que a bateria será submetida. Conforme ilustrada na Figura 31, a capacidade nominal é baseada nos dados informados no *datasheet* e a tensão nominal é referente às informações da curva de descarga (curva de descarga dada pelo fabricante), estas utilizadas nas simulações. A capacidade da bateria, em Ah, é calculada pela capacidade de uma célula multiplicada pelo número de *string* associadas em paralelo.

Figura 31 – Parâmetros da bateria do MATLAB®/Simulink®.



Fonte: (MATHWORKS, 2023)

Ao se utilizar sistemas de armazenamento de energia em baterias é necessária uma

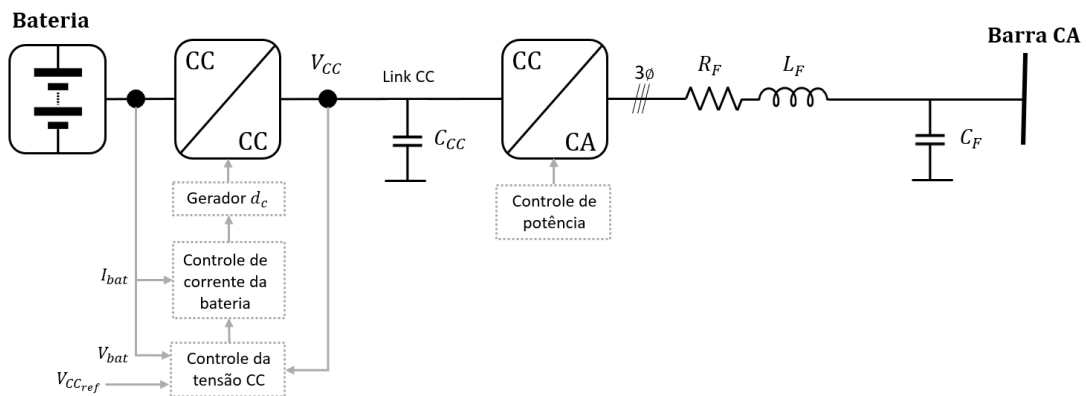
modelagem avançada de monitoramento e controle dos parâmetros essenciais das baterias. Esse monitoramento é realizado através do BMS que é responsável por monitorar e controlar a bateria, garantindo a operação segura das células. De acordo com (BAZARGAN, 2014), esse sistema é composto por placas eletrônicas de múltiplas entradas e saídas digitais e analógicas, unidades centrais de processamento e também módulos de comunicação para fazer a ponte entre sistemas de controle de supervisão. O sistema evita que as células individuais superaqueçam, além de calcular o SoC em uma célula de bateria, profundidade de descarga (DoD) e eficiência (η). Seu monitoramento oferece uma operação mais robusta para o sistema de armazenamento tendo em vista a aplicação do BESS (BAZARGAN, 2014).

O SoC é um indicador do nível de energia armazenada na bateria. O cálculo desse parâmetro auxilia a determinar o limite de carregamento/descarregamento, o que impede a deterioração permanente nas estruturas internas na bateria. Ele depende diretamente da corrente de entrada (processo de carga), ou corrente de saída (processo de descarga) e varia inversamente em relação capacidade nominal da bateria. A eficiência indica a relação entre energia restaurável e a energia total armazenada. À medida que acontece os ciclos de carga/descarga, parte da energia armazenada não é restaurada, devido a degradação das células da bateria, ou seja, esse parâmetro não é fixo.

O DoD refere-se ao nível de descarregamento da bateria. Isto é, quanto maior for a profundidade de descarga, maior será a capacidade extraída da mesma, tornando o tempo de vida menor do que o esperado. Por isso, deve-se haver um limite para o descarregamento visando durabilidade da bateria.

Como dito anteriormente, o BESS é considerado como o sistema composto por baterias e o sistema de conversão de energia. A Figura 32 apresenta o modelo do BESS, no qual uma bateria é conectada à rede CA através do VSC, o link CC e um conversor CC/CA bidirecional (DELILLE; FRANCOIS; MALARANGE, 2012; WANG et al., 2015; FARROKHABADI et al., 2017; BAZARGAN; BAHRANI; FILIZADEH, 2018).

Figura 32 – Topologia do modelo completo do BESS.



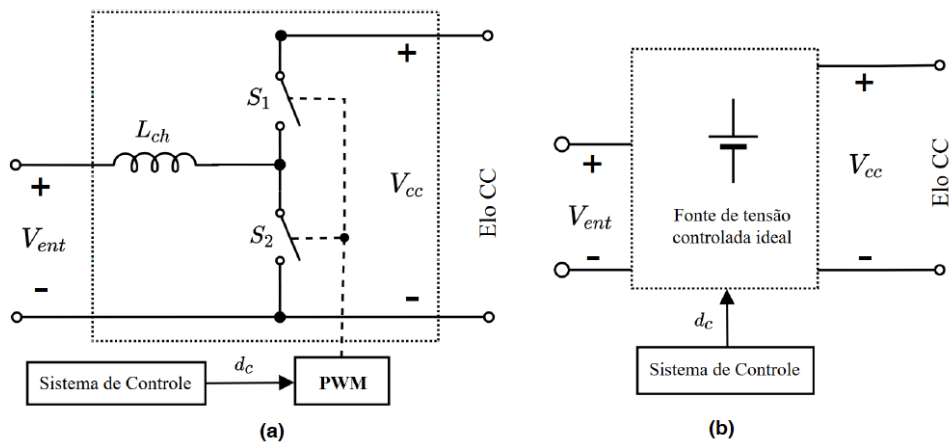
Fonte: Adaptado de (DELILLE; FRANCOIS; MALARANGE, 2012; BAZARGAN; BAHRANI; FILIZADEH, 2018)

Na topologia apresentada na Figura 32, o sistema de conversão CC é composto por um conversor eletrônico de potência CC/CC, o sistema de controle de potência da bateria e um link CC que possui um capacitor. A utilização de conversores de potência em conjunto com SAE, em geral, requer desses dispositivos a possibilidade de conectar ao controle de tensão/corrente e um fluxo de potência que possa fluir em ambos os lados do conversor, ou seja, com a capacidade de carregar e descarregar o banco de baterias. Para tal, conversores CC-CC bidirecional pode ser usado como interface entre o banco de baterias e sua devida aplicação, que no caso em questão seria o BESS.

O conversor CC/CC é um conversor bidirecional do tipo *buck/boost*, usado como alternativa para elevar o nível da tensão das baterias e regular a tensão do link CC, carregando e descarregando adequadamente um banco de baterias do BESS, não sendo necessário, assim, um grande número de módulos ou células em série para atingir elevadas tensões CC (BAZARGAN, 2014).

A Figura 33 mostra os modelos do conversor CC/CC, podendo ser utilizado o modelo chaveado e modelo médio, representados nas Figuras 33(a) e 33(b), respectivamente. Como visto, o conversor CC/CC é conectado ao VSC através do link CC e na entrada é utilizado um indutor para limitar o *ripple* de corrente (BAZARGAN; BAHRANI; FILIZADEH, 2018; FARROKHABADI et al., 2017). O conversor CC/CC pode ser modelado por valores médios ou chaves ideais (modelo com chaveamento), analogamente como o VSC apresentado anteriormente.

Figura 33 – Topologia do modelo completo do BESS.



Fonte: Adaptado de (BAZARGAN; BAHRANI; FILIZADEH, 2018; FARROKHABADI et al., 2017)

O controle de potência da bateria da Figura 32, consiste de dois controladores PI concatenados, sendo um laço de tensão externo e um laço de corrente interno, definidos pelas Equações 15 e 16:

$$I_{bat_{ref}} = K_{v_b} \left(1 + \frac{1}{T_{v_b} \cdot s}\right) \cdot (V_{cc_{ref}} - V_{cc}) \quad (15)$$

$$V_{bat_{ref}} = K_{i_b} \left(1 + \frac{1}{T_{i_b} \cdot s}\right) \cdot (I_{bat_{ref}} - I_{bat}) \quad (16)$$

onde o ganho K_{v_b} e a constante de tempo T_{v_b} do controlador PI do bloco de controle de tensão V_{cc} ; e K_{i_b} e T_{i_b} são, respectivamente, o ganho e a constante de tempo do controlador PI do controle de corrente da bateria. Os métodos de ajuste dos controladores podem ser encontrados em (DELILLE; FRANCOIS; MALARANGE, 2012; PEGUEROLES-QUERALT; BIANCHI; GOMIS-BELLMUNT, 2014; GKOUNTARAS, 2017).

Considerando o controle concatenado que fornece o *duty cycle* (d_c) para as chaves do conversor CC/CC, com base na variação da tensão do link CC (V_{cc}) e o valor de referência (MUKHERJEE; STRICKLAND, 2015a); (MUKHERJEE; STRICKLAND, 2015b; FARROKHABADI et al., 2017). Uma vez que o sinal de saída do controlador concatenado é a tensão de referência da bateria, o bloco gerador d_c calcula o valor usando a tensão de referência da bateria e o valor atual de V_{cc} .

A dinâmica de controle de potência fornecida pela bateria no modelo apresentando na Figura 32 ocorre no link CC. Considerando a condição que o VSC consome energia da rede, o P_{vsc} tem fluxo de potência no sentido VSC para a bateria fazendo com que o conversor CC/CC opere no modo *buck*, carregando a bateria. Porém, quando o VSC fornece energia para a rede, o P_{vsc} tem fluxo de potência no sentido da bateria para o VSC, e desta forma o conversor CC/CC opera no modo *boost*, ocasionando a descarga da bateria (FARROKHABADI et al., 2017).

Ao considerar que o VSC fornece energia para a rede, na condição onde a potência P_{vsc} demandada pelo VSC aumenta tornando maior que a potência fornecida pela bateria, a tensão V_{cc} diminui e conseqüentemente ficará com o valor menor que sua referência predefinida, visto que o controle de potência da bateria irá atuar para aumentar a sua potência. Sob o mesmo ponto de vista, quando o P_{vsc} diminui e torna menor que o valor da potência da bateria, a tensão V_{cc} aumenta e torna-se maior do que sua referência predefinida, assim o controle de potência da bateria atua para diminuir P_{bat} . Portanto, para obter a condição equilíbrio, as seguintes condições precisam ser satisfeitas $P_{vsc}=P_{bat}$ e $V_{cc}=V_{cc_{ref}}$ (MUKHERJEE; STRICKLAND, 2015a; MUKHERJEE; STRICKLAND, 2015b; FARROKHABADI et al., 2017).

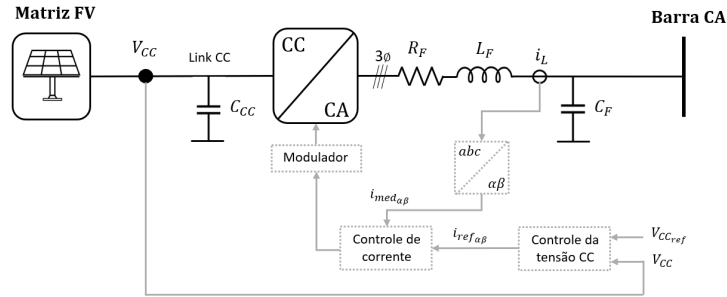
3.3.2 Modelo do sistema fotovoltaico

O sistema de geração fotovoltaica considerado na tese, cuja estrutura é ilustrada na Figura 34, mostra o modelo do sistema FV que conecta uma matriz FV à rede CA através de um VSC (YAZDAMI; IRAVANI, 2010).

O modelo utilizado para representar a matriz fotovoltaica foi o bloco *PV Array* da biblioteca do *Matlab®/Simulink®*. Esse bloco permite utilizar os modelos predefinidos dos

módulos FV da *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) *System Advisor Model*, os seus valores de parâmetros nominais e curvas características são parametrizados (N. DIORIO, 2017).

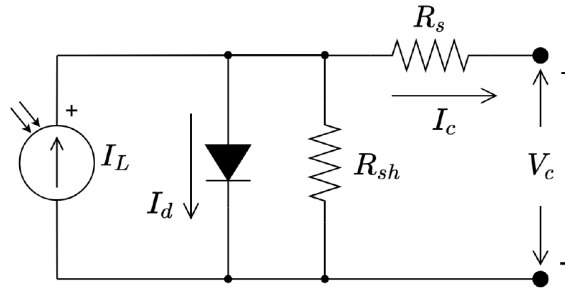
Figura 34 – Topologia de controle do sistema FV.



Fonte: Próprio autor.

A construção dos módulos FV se dar por meio das células FV, as quais possuem uma curva I-V, que tem uma relação com a irradiação e temperatura e podem ser modeladas de acordo com a Figura 35, onde a fonte de corrente dependente da irradiação I_L em paralelo ao diodo e a resistência R_{sh} , e uma resistência R_s , representando as perdas. A corrente e tensão de saída da célula, definem a curva I-V dadas por I_c e V_c , respectivamente (VILLALVA; GAZOLI; FILHO, 2009; MA; YANG; LU, 2014).

Figura 35 – Modelo da célula FV.



Fonte: Adaptado de (VILLALVA; GAZOLI; FILHO, 2009; MA; YANG; LU, 2014)

O trabalho proposto, por simplificação da modelagem, mantém o parâmetro temperatura ambiente fixo no valor na condição padrão de teste *Standard Test Conditions* (STC) em 25°C e os valores de irradiação solar definidos para os respectivos cenários apresentados no capítulo de resultados das simulações. Nestas condições, a potência que o painel FV fornece é igual a sua potência de pico P_{pmax} e a tensão V_p e corrente I_p do painel FV são exatamente os valores nominais do ponto de máxima potência do painel.

Após as definições dos parâmetros, o próximo passo é definir a configuração do arranjo FV que será utilizada nas simulações, esta feita a partir da escolha do modelo do módulo FV utilizado, além do número de módulos conectados em série N_{ps} , que formam uma *string*, e

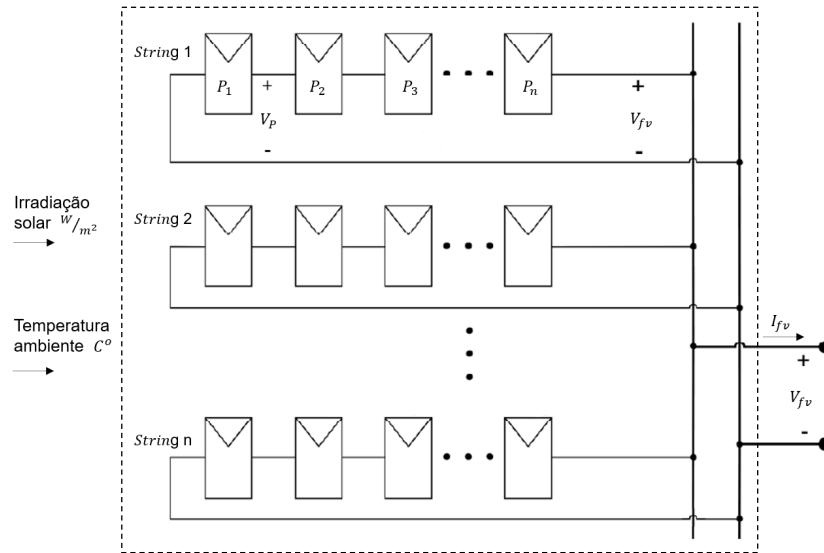
o número de *strings* em paralelo N_s , como pode ser observado na Figura 36 . Desta forma, a potência máxima fornecida pelo arranjo FV, sua tensão e corrente terminais são calculadas pelas equações:

$$P_{fv} = N_{ps} \cdot N_s \cdot P_{pmax} \quad (17)$$

$$V_{fv} = N_{ps} \cdot V_p \quad (18)$$

$$I_{fv} = N_s \cdot I_p \quad (19)$$

Figura 36 – Topologia do arranjo FV.



Fonte: Próprio autor.

A fim de garantir um menor esforço computacional, foi desconsiderado o controle *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) que atuaria no controle da tensão do arranjo FV através do *duty cycle* de um conversor CC/CC e permitiria ao sistema FV gerar a sua máxima potência em cada condição de temperatura e irradiação ao qual o sistema seria submetido. O conversor, que seria utilizado, é o mesmo apresentado no modelo do BESS, sendo do tipo *Buck-Boost* de dois quadrantes, tipicamente utilizado em sistemas FV. Este conversor CC/CC seria conectado ao VSC através do link CC e um indutor seria utilizado na entrada do conversor CC/CC para limitar o *ripple* de corrente.

3.4 Conclusão do capítulo

O capítulo apresentou os modelos dos RED que serão utilizados ao longo da tese durante as simulações dos respectivos cenários propostos. A tese restringe-se às MRs baseadas em conversores eletrônicos, com RED do tipo BESS e sistemas fotovoltaicos. Os conversores

CC/CA, foram descritos brevemente os módulos de potência, sistemas de controle e modos de operação. Na representação das fontes primárias, foram expressos os modelos utilizado para o sistema de armazenamento em baterias e arranjo FV, bem como do circuito CC que interligam essas fontes ao conversor VSC (no caso o BESS). A definição dos diferentes modelos será importante para a análise dos resultados finais da tese, uma vez as simulações utilizarão os modelos apresentados nesse capítulo.

4 SISTEMA DE CONTROLE BASEADO NO APRENDIZADO EMOCIONAL DE MAMÍFEROS

Neste capítulo é demonstrado a superfície medial dos mamíferos chamada de sistema límbico que responde pelos comportamentos instintivos, posteriormente à descrição dos componentes deste sistema, será apresentado sua modelagem matemática. Como o intuito dessa tese é uma aplicação em sistemas de controle, e não em conceitos biológicos, não serão apresentadas todas as estruturas do sistema límbico. Portanto, o estudo será focado nas principais estruturas que influenciam no desenvolvimento do modelo proposto. Ao final do capítulo, na Seção 4.2, serão introduzidos os conceitos da técnica do PSO, que posteriormente será utilizada para otimizar os parâmetros dos controladores propostos na tese.

4.1 Controlador inteligente baseado no aprendizado emocional do cérebro

Muitas técnicas de controle convencionais são aplicadas em processos lineares e invariantes no tempo por apresentarem bom desempenho. Entretanto, em inúmeros problemas reais, cuja modelagem matemática é complexa ou muitas vezes inviável, esses controladores não se configuram como os mais adequados (BORDON et al., 2004). Muitos sistemas apresentam características não lineares e até mesmo variantes no tempo, que interferem diretamente nos sistemas de controle, como deterioração dos componentes ou variações de parâmetros ambientais. Tais variações alteram significativamente o desempenho de sistemas de controle. Por essa razão, estratégias que modificam a estrutura do controlador ou simplesmente os seus parâmetros, vêm sendo cada vez mais utilizadas para adaptar as estratégias de forma a independem da complexidade das leis de controle, como pode ser visto em (NUELLA; CHENG; CHIU, 2009), onde diversas propostas para o uso de controladores PID adaptativos são aplicadas a sistemas não lineares.

Diante do surgimento das novas técnicas de controles inteligentes, assim chamados por emularem particularidades da inteligência humana, problemas como estes vêm permitindo que essa classe de controladores seja uma alternativa eficiente, levando em consideração a sua capacidade de aprender e adaptar os parâmetros e melhorar o desempenho do controle e contornar as dificuldades encontradas com as variações externas ao sistema ou no próprio sistema (SHAHMIRZADI, 2005). Considerando assim uma adaptação as novas condições ambientais; tais como incertezas nas medições sensoriais, variações paramétricas de sistemas dinâmicos e, a partir disso, contornar tais situações indesejadas por meio de uma resposta rápida, melhorando assim o desempenho do controle como um todo.

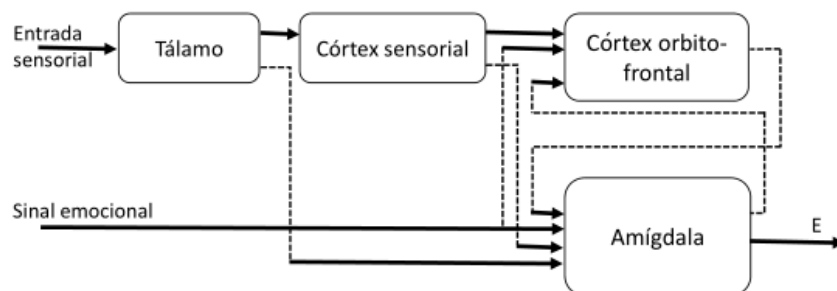
A partir de estudos e modelos relacionados ao tema, (MOREN; BALKENIUS, 2000; LUCAS; SHAHMIRZADI; SHEIKHOESLAMI, 2004; LUCAS; RASHIDI; ABDI, 2004) propuseram uma nova arquitetura de controlador baseado no aprendizado emocional denominado

de: controlador inteligente baseado no aprendizado emocional do cérebro chamado de BELBIC.

O BELBIC é um controlador bio-inspirado pertencente à classe de controles *model-free*¹, com aplicações bem sucedidas para tomar decisões e controlar sistemas lineares simples como em (LUCAS; SHAHMIRZADI; SHEIKHOLESAMI, 2004), e também em sistemas não-lineares como o controle de um sistema de controle de um motor síncrono magnético e regulador de tensão automática (RVA) (LUCAS; RASHIDI; ABDI, 2004; RAHMAN et al., 2008a), micro-calor permutado (ROUHANI et al., 2007a), controle de voo (MEHRABIAN; LUCAS, 2009), controle de deslocamento e posicionamento do guindaste (JAMALI et al., 2008), incorporação de controladores PID (ROUHANI et al., 2007b), controlador de veículo de lançamento aeroespacial (MEHRABIAN; LUCAS; ROSHANIAN, 2006), robô omnidirecional (SHARBAFI; LUCAS; DANESHVAR, 2010), controle de carga-frequência (FARHANGI; BOROUSHAKI; HOSSEINI, 2012) e diversas outras aplicações na área de engenharia de controle (RAHMAN et al., 2008b; MARKADEH et al., 2011). Por isso, as técnicas BELBIC têm demonstrado capacidade para controlar sistemas dinâmicos não-lineares diversos.

Motivado pelo sucesso da modelagem funcional de emoções em aplicações de engenharia de controle, foi desenvolvido um modelo de aprendizagem denominado de aprendizado emocional do cérebro (do inglês *Brain Emotional Learning* – BEL), apresentado na Figura 37, o qual é inspirado no mecanismo de funcionamento do sistema límbico cerebral dos mamíferos. O modelo é constituído por duas principais áreas, córtex orbitofrontal e amígdala, que são responsáveis pela realização dos algoritmos de aprendizagem. Com isso, o desenvolvimento deste modelo, terá um sistema inteligente com a capacidade de aprendizagem rápida na tomada decisões, o que proporcionou grande aplicabilidade em diversas áreas de sistemas de controle (MORÉN; BALKENIUS, 2000).

Figura 37 – Modelo computacional de aprendizagem emocional na amígdala.



Fonte: Adaptado de (MORÉN; BALKENIUS, 2000).

A tese é fruto de uma pesquisa que não requer apenas abordar o conhecimento na área de engenharia de controle, mas também obter conhecimentos básicos de alguns sistemas biomórficos. Assim, são revisitados e apresentados alguns conceitos básicos desse sistema.

¹ Do inglês *model-free* ou livre de modelo, ou seja, nenhum modelo do processo está disponível e, portanto, o controlador não é projetado para um sistema específico.

Na verdade, o principal objetivo do capítulo é apresentar as estruturas do sistema que estão envolvidos no processo emocional. Como mencionados anteriormente, a parte do cérebro dos mamíferos chamado de límbico será o principal enfoque.

4.1.1 Processo emocional

A origem da palavra emoção provém do latim *movere*, mover, por em movimento. É fundamental compreender que a emoção é um movimento de dentro para fora, um modo de comunicar os nossos mais importantes estados e necessidades internas (RATEY, 2002).

As relações entre corpo e mente, razão e emoção, vêm sendo estudadas pela Filosofia, Psicanálise, Psicologia e a Biologia, a partir da segunda metade do século XIX e princípios do século XX. O que marcou esse período é o interesse científico voltado para os processos cognitivos, os quais incluem as atividades mentais relacionadas à aquisição de conhecimento e conectadas ao raciocínio e à memória (ESPERIDIÃO-ANTONIO et al., 2008).

A aprendizagem emocional é uma estratégia que se baseia em avaliações emocionais que é compreendida como a avaliação do impacto dos estímulos externos sobre o funcionamento do sistema a curto prazo, visando manter suas perspectivas de sobrevivência a longo prazo. Sabe-se que este processo ocorre no sistema límbico (MAREN, 1999), e os estudos apontam que a aprendizagem é o fator mais importante através do qual os organismos complexos são capazes de sobreviver. Geralmente, aprendem e adaptam-se ao seu ambiente, mas afirma-se que, certamente, todos os organismos têm capacidades que lhes permitam operar dentro do seu ambiente (HOLLAND, 1989).

Dois pontos de vista podem ser observados quando se trata de adaptação entre gerações no processo evolutivo *versus* aprendizagem dentro de uma geração, e a resposta aos estímulos ambientais específicos. O primeiro ponto seria organismo é inteligente para interagir com seu ambiente, quando requer algumas habilidades de aprendizagem. Por esse motivo é que o próprio ambiente está mudando constantemente. Assim, para manter o mesmo desempenho dentro do ambiente em mudanças, o organismo deve possuir mecanismos de adaptação. Porém, outro ponto é que algumas adaptações devem ser aprendidas dentro de um intervalo de tempo mais curto ao invés de gerações. No entanto, o sistema de aprendizagem deve ser capaz de avaliar a condição ambiental atual e com isso, o sistema analisar a direção da aprendizagem e se ela ajuda a alcançar os objetivos do sistema.

Com essa finalidade, o organismo deve avaliar o seu desempenho em relação a alguns critérios fornecidos internamente ou externamente e modificar as suas ações (GRAY, 1975; KLOPF, 1988; MOWRER, 1960). Como experiências contínuas possuem um auxílio do organismo e realiza associações entre as condições ambientais, produzindo um aperfeiçoamento no seu desempenho e, em princípio, leva a um comportamento mais adaptável ao longo do tempo. Neste caso, pode-se dizer que sinais internos muitas vezes desempenham um papel mais forte do que os externos, normalmente devido à autonomia inerente de organismos complexos,

sendo o estado interno – tanto emocional e cognitivo – responsáveis por desempenhar papéis fundamentais no aprendizado.

No âmbito das pesquisas de ciências cognitivas, as emoções e os sinais emocionalmente carregados, são dispostos: positivos contra sinais negativos. Sendo as emoções positivas uma recompensa provável para o sistema, por exemplo, a esperança, enquanto negativo previu que haveria uma punição, por exemplo, medo (LEDOUX; FELLOUS, 1995; PANKSEPP, 1981). O fator emocional, historicamente, tem sido considerado um fator negativo, com isso dificulta o processo racional na tomada de decisão. Porém, as importâncias das emoções nas atividades cognitivas humanas estão sendo aos poucos documentadas por psicólogos (NESSE, 1998; GREENE et al., 2001). Na verdade tornou-se claro que longe de ser um traço negativo, as emoções são forças positivas cruciais para um comportamento inteligente em sistemas naturais (INOUE; KAWABATA; KOBAYASHI, 1996; BAY, 1997).

A principal função da emoção é avaliar os estímulos e focar a atenção do sistema sobre os sinais que mais contribuem para alcançar os objetivos do sistema. Ao avaliar gastar os recursos em todos os estímulos sensoriais, a avaliação emocional pode ajudar a se concentrar em estímulos relevantes, que são mais decisivos.

No estudo proposto, não se tem o intuito de distinguir os sinais emocionais nesse sentido. Pois o modelo computacional e qualquer sinal positivo ou negativo será automaticamente refletido na saída do sistema através do modelo, ou seja, as recompensas são modeladas como sinais positivos, enquanto as punições como sinais negativos.

De maneira geral, o papel das emoções é centrado na avaliação dos estímulos recebidos e suas respectivas contribuições, de forma que o sistema alcance um determinado objetivo de maneira menos dispendiosa. Assim sendo, pode-se afirmar que o controle emocional visa poupar recursos na avaliação de todos os possíveis estímulos sensoriais, e a avaliação concentra-se nos sinais que realmente são relevantes, ou seja, aqueles que têm o potencial de ser mais decisivos no processo de controle. Sendo o sistema límbico o circuito neural que rege todo o comportamento emocional e as forças emocionais, ou seja, o processamento das emoções.

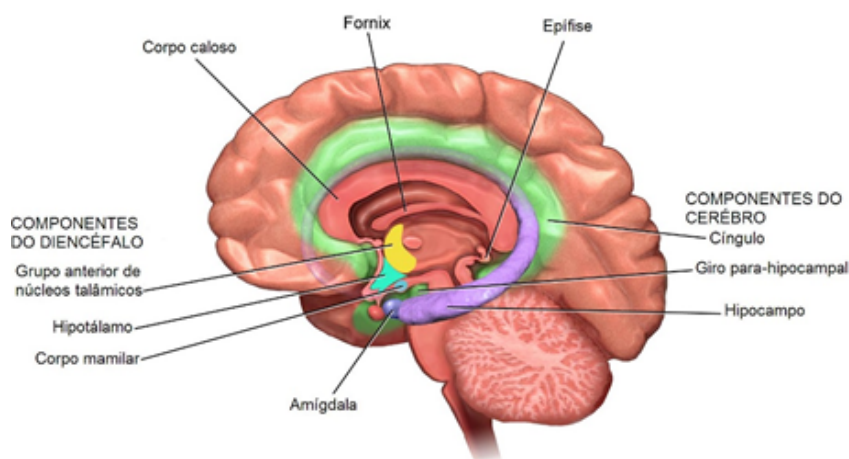
4.1.2 Sistema límbico

O sistema límbico é responsável pelos comportamentos instintivos, pensamentos e forma de ser, que inclui nossa personalidade, as reações aos estímulos externos, memória, impulsos básicos, ira, prazer e sobrevivência. Além das funções citadas, segundo (GUYTON; HALL; GUYTON, 2006), também é responsável por controlar várias condições internas, tais como: temperatura corporal, impulsividade alimentar e peso corpóreo. Por ter o sistema límbico mais desenvolvido que outros animais, o ser humano é capaz de adaptar o seu comportamento com mais flexibilidade em resposta às mudanças no ambiente.

A anatomia e o funcionamento do sistema límbico são bastante complexos, o que acarreta

em grande desafio por parte dos pesquisadores com relação ao seu estudo e entendimento. O primeiro neurologista a ligar algumas estruturas do cérebro às emoções foi o francês Pierre Paul Broca (1877) descrevendo o "grande lobo límbico" (FINGER, 2001). Ele notou que as amígdalas, as formações hipocampais e os giros do cíngulos estavam todos relacionados com as emoções. Broca foi o primeiro cientista a chamar de grande lobo límbico a todas essas estruturas mencionadas, localizadas em volta do diencéfalo (Figura 38) na região medial dos hemisférios cerebrais. Adotou-se também o termo límbico em função do significado (do latim *Limbus* : orla, anel, em torno de), confirmado por Sarnat e Netsky, uma vez que essas estruturas, presentes em todos os mamíferos, situam-se em torno do topo do tronco encefálico. Outras estruturas como o núcleo accumbens, septo, ínsula, córtex somatossensorial e tronco cerebral também estão implícitos no sistema límbico, porém de menor relevância. (SARNAT; NETSKY, 1974).

Figura 38 – Sistema límbico.

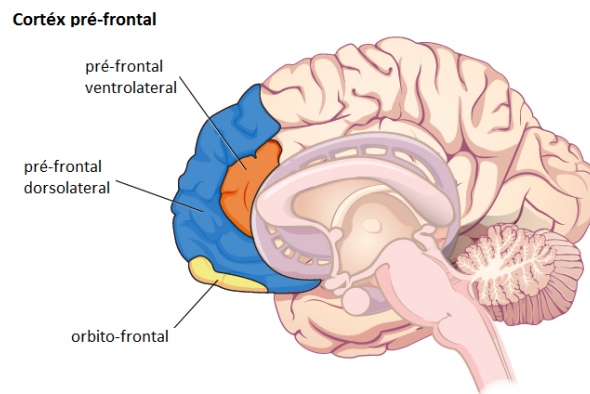


Fonte: Adaptado de (COMMONS, 2023).

O sistema límbico devido a sua complexidade anatômica e funcional, é um desafio para os neurocientistas. Considerando que no sistema as estruturas mais importantes são a formação hipocampal e a amígdala. A formação hipocampal é a sede do aprendizado e da memória de curto prazo. Já a amígdala está relacionada com as emoções e suas diversas expressões como raiva e alegria, por exemplo. As duas estruturas formam diferentes conexões com o resto do sistema nervoso, principalmente com o hipotálamo e córtex pré-frontal (Figura 39), possuindo importantes conexões com esse sistema, que corresponde à região anterior do lobo frontal e não tem função motora. Para exemplificar a importância dessas estruturas e tornar compreensiva a sua funcionalidade nesse sistema, estudos foram realizados apontando que chimpanzés submetidos à ressecção² do córtex pré-frontal não apresentavam nenhuma reação emocional aos estímulos externos, não demonstrando nem alegria ou tristeza, tranquilidade ou raiva.

² Operação cirúrgica para a retirada parcial ou total de um órgão ou de outra estrutura do corpo humano (nervo, vaso, músculo, tendão, osso etc.), pode ser em razão de alguma patologia, ou não.

Figura 39 – Córtex pré-frontal.



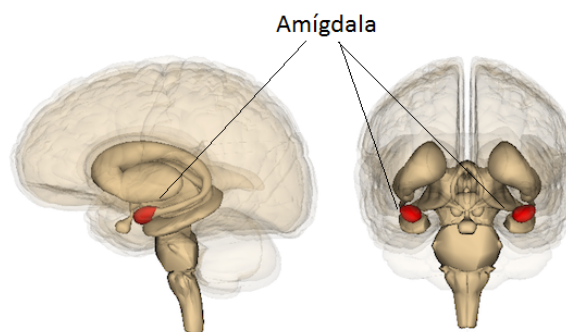
Fonte: Adaptado de (COMMONS, 2023).

Como o foco deste trabalho é aplicação do modelo em sistemas de engenharia e não nos conceitos biológicos, o modelo estabelecido não é um modelo que incluirá todas as estruturas do sistema límbico. De fato, foi desenvolvido um modelo que aborda as propriedades básicas desse sistema que representa a modelagem proposta pelos autores e estas regiões serão apresentadas a seguir.

4.1.2.1 Amígdala

A amígdala é uma das mais importantes estruturas cerebrais relativas às emoções, considerada uma pequena área subcortical em forma de amêndoa que se comunica com todos os outros córtices sensoriais e áreas dentro do sistema límbico. Nela ocorre o condicionamento físico primário do sistema (MOREN, 2002). A Figura 40 mostra sua localização no interior da metade anterior do unco do giro parahipocampal, imediatamente anterior à cabeça do hipocampo que ocupa a sua metade posterior e, portanto, constitui a parede anterior do corno temporal.

Figura 40 – Amígdala.

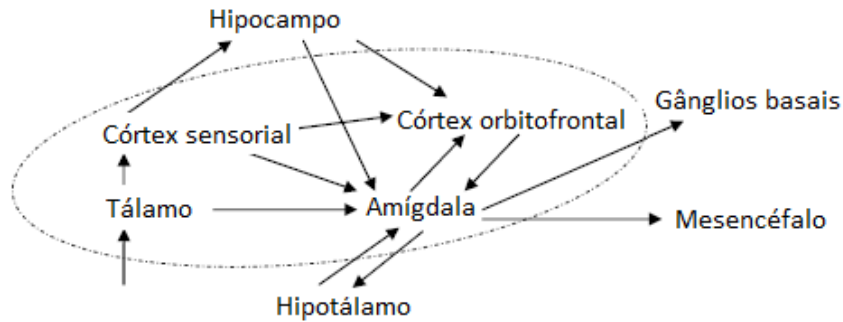


Fonte: Adaptado de (COMMONS, 2023).

A amígdala se interconecta com o hipocampo, com o tálamo, com os núcleos septais e com o córtex pré-frontal. Essas conexões garantem seu importante desempenho na mediação e

controle das atividades emocionais, como amizade, amor e afeição, nas exteriorizações do humor e, principalmente, nos estados de medo e ira e na agressividade. As conexões da amígdala com outros componentes são ilustrados na Figura 41.

Figura 41 – Conexões da amígdala com outros componentes do sistema límbico.



Fonte: Adaptado de (MOREN, 2002).

Os estudos apontam que a associação entre um estímulo e suas consequências emocionais ocorre na amígdala (LEDOUX; FELLOUS, 1995; ROLLS, 1995). Nessa região, os estímulos são extremamente analisados nos córtices sensoriais, bem como estímulos categorizados de forma grosseira no tálamo estão associados a um valor emocional. O seu papel, de fato, é atribuir valor emocional a cada estímulo que é emparelhado com um sinal de reforço primário.

Os três tipos de sinais de entrada na amígdala são (BEHESHTI; HASHIM, 2010):

1. Os sinais que possuem partes de códigos da atual situação sensorial. Esses sinais são inicialmente neutros, mas podem adquirir propriedades emocionais a partir do aprendizado. Exemplo: um questionamento do que você mesmo está vendo ou ouvindo;
2. O sinal que carrega a informação sobre o valor do estímulo, possui um significado inato. Exemplo: se uma comida é apetitosa, aversiva ou até se pode ser comida;
3. O sinal informa a amígdala o estado motivacional atual do organismo. Exemplo: o organismo informar se essa pessoa está com fome, sono ou ambas.

Para facilitar o entendimento da importância e suas consequências, serão apresentados estudos que mostram que lesões ou experiências traumáticas na amígdala pode causar.

Segundo (ROLLS, 1986), os experimentos de Weiskrantz, mostraram que animais com lesão bilateral na amígdala não podem mais adquirir uma reação emocional aos novos estímulos na presença de um estímulo aversivo (ROLLS, 1992). Estes danos produzem efeitos semelhantes à síndrome de Klüver-Bucy em Macacos, resultando em mansidão, falta de emoção, perda de apetite e consumo de alimentos rejeitados (KOLB; WHISHAW, 2009). Um ponto fundamental que se deve levar em consideração é que estudos evidenciam que a aprendizagem ocorre na amígdala.

Em relação aos estudos sobre a condição "Memória e Trauma", de acordo com os trabalhos descritos em (CARTER; FRITH, 1998), mostram que experiências particularmente traumáticas podem passar sem atingir o hipocampo e ir diretamente à amígdala. Essas recordações são inconscientes; o armazenamento individual não é percebido. Os cientistas acreditam que recordações armazenadas nas amígdalas são responsáveis por fobias e transtorno de estresse pós-traumáticas³. Para exemplificar e facilitar esse estudo, suponha que, acidentalmente, uma criança ponha a mão em uma superfície quente e receba uma queimadura bastante dolorosa e sórdida. Se essa experiência estiver transtornando particularmente essa memória poderia ser armazenada na amígdala e poderia reaparecer como um medo inexplicável de queimaduras ou de estar queimando.

Em outra situação apontada, na qual aconteça a mesma coisa, a condição agora é "Memória e Emoção", mas esta nova experiência seja mais desagradável do que catastrófica na mente da criança. Ela sofre dor e medo e aprende a não tocar aquela superfície quente. Isso é armazenado de forma rápida nos registros perigosos da memória ao longo da vida dela, devido à tensão emocional causada pela queimadura e ao fato de que esta informação afeta diretamente a sobrevivência (CALVIN, 1998).

Agora imagine a seguinte situação: uma lição aprendida com as dificuldades naturais dos fatos são registradas mais claramente nas mentes das crianças do que advertências ou repreensões, em que muitas vezes as advertências perduram na memória de forma breve antes de evidenciar parcialmente de forma sutil a essa recordação.

Estudos apontam que as informações na memória de curto prazo que são utilizadas frequentemente ou repetidas vezes, tornar-se-ão, eventualmente, parte da memória de longo prazo. A partir do momento em que a maioria das pessoas relembram das lembranças com prazer, ou seja, acessam as recordações a longo prazo, que seu cérebro julgou importante o processo acontece.

Uma informação importante é que há diferentes tipos de recordações a longo prazo. Os cientistas sugerem que os instintos como memórias geneticamente codificadas, tendo elas armazenados no núcleo da espinha dorsal, em geral, ficam com a pessoa por toda a vida. Por exemplo: pessoas geralmente saltam ao ouvir um barulho alto que soe de repente. Podendo ser separadas os tipos de memória em:

1. Memória processual ocorre quando o indivíduo, repete um movimento muitas vezes fazendo com que memória daquele movimento seja armazenada no putâmen e no cerebelo. Um exemplo desta memória é o andar de bicicleta. Isto explica porque certas atividades parecem ficar automáticas com bastante prática.
2. Memórias episódicas são pessoais, como filmes que representam experiências passadas.

³ TEPT é um tipo de transtorno de ansiedade que pode se desenvolver em pessoas que vivenciaram um evento traumático.

O seu armazenamento é realizado em várias partes do córtex, sendo recuperados e organizados pelos lóbulos. Algo que será mostrado a um indivíduo é armazenado no córtex visual, enquanto que um aroma é armazenado em um lugar diferente.

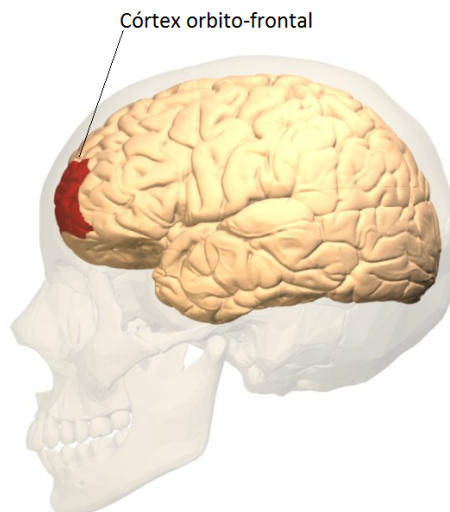
3. Memórias semânticas são fatos que estão armazenados no lóbulo temporal. Por exemplo, saber que o presidente do Brasil mora no Palácio da Alvorada é uma memória semântica. Elas diferem de lembranças de episódios já que são independentes do passado de uma pessoa.

As experiências particularmente traumáticas poderiam criar recordações de medo e essas memórias serão armazenadas na amígdala, e conseqüentemente as pessoas não estariam cientes de que possuem esta recordação. Os cientistas acreditam que recordações de medo são responsáveis por fobias e desordens de tensão pós-traumáticas.

4.1.2.2 Córtex orbitofrontal

O córtex orbitofrontal pode ser observado na Figura 42 na parte frontal craniana e é responsável por interagir com a amígdala, reciprocamente. Enquanto a amígdala aprende associações apropriadas entre estímulos emocionais, o córtex orbitofrontal inibe a expressão dessas associações, conforme necessário, dependendo do contexto e de outros fatores.

Figura 42 – Córtex pré-frontal.



Fonte: Adaptado de (COMMONS, 2023).

Além disso, o orbitofrontal desempenha funções importantes no sistema límbico, entre as quais a capacidade de gerar sinais negativos de reforço visando mitigar quaisquer respostas que porventura sejam inapropriadamente geradas pela amígdala. Operando com base na diferença entre recompensa ou punição esperada e as reais. A motivação esperada fica impressa nas estruturas do cérebro ao longo do tempo como resultado de vários mecanismos de aprendizagem

e atinge o córtex orbitofrontal através do córtex sensitivo e da amígdala. A recompensa ou punição real vem via mundo exterior, se os sinais de motivação esperados e detectados forem idênticos, a saída é a resposta regular a esse estímulo. Caso contrário, o córtex orbitofrontal inibe a resposta emocional e promove maneiras de aprender mais. Esse aprendizado e adaptação é um elemento-chave para a robustez dos organismos quando submetidos a ambientes em constante mudança, no caso de sistemas dinâmicos, associa-se às perturbações e até mudanças na dinâmica do sistema. Ao mesmo tempo, a robustez às mudanças de condições também é uma característica fundamental de qualquer problema de engenharia. Adicionalmente, nos últimos anos, o comportamento emocional do cérebro tem sido objeto de atenção como um novo paradigma no campo do design de sistemas de controle. Vale ressaltar que o modelo abordado de sistema límbico, pode diferir em algumas literaturas (FUSTER, 2006; SHIMAMURA, 1995; KOLB; WHISHAW, 2009).

Segundo (FUSTER, 2006) três funções inter-relacionadas podem ser vistas para o córtex pré-frontal: memória de trabalho, conjunto preparatório e controle inibitório. O conceito da memória de trabalho é a representação de eventos e ações atuais, bem como eventos no passado recente. Já o conjunto preparatório é a projeção de outras estruturas em antecipação à ação iminente. Por fim, o controle inibitório é a supressão seletiva de áreas que podem ser inadequadas na situação atual.

Uma afirmação pode ser expressa, onde a amígdala está envolvida no aprendizado inicial de uma resposta emocional enquanto o córtex orbitofrontal é necessário para omitir o reforço esperado ou punir e controlar mapeando os estímulos para a resposta emocional ocorridas no aprendizado da amígdala (ROLLS, 1995).

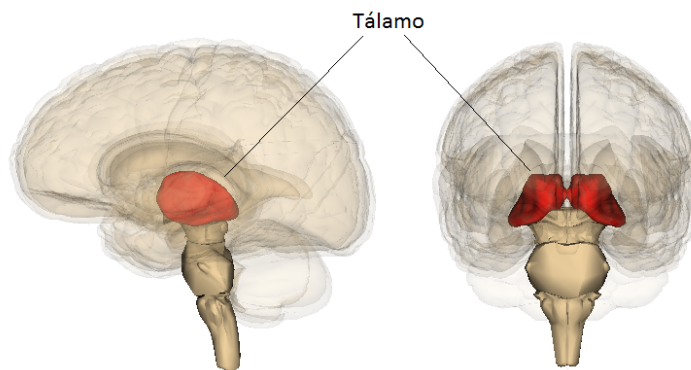
As lesões no córtex frontal resultam na incapacidade de mudar o comportamento ou ação que não é mais apropriada (SHIMAMURA, 1995; KOLB; WHISHAW, 2009). Para exemplificar essa lesão, aplicou um teste de classificação de cartões, onde indivíduos de um grupo devem primeiro descobrir como classificar cartões de acordo com um critério simples, como a cor. Ao concluir, os critérios são alterados e os sujeitos têm que encontrar uma nova regra para classificar os cartões. Pacientes com essa deficiência frontal muitas vezes não são capazes de fazer esta classificação. Eles podem ser capazes de verbalizar que as regras mudaram, mas serão insistentes no seu comportamento incorreto.

Por fim, lesões nessa região pode dificultar tarefas simples como: imagine a seguinte situação em que será atribuída a uma pessoa a tarefa de monitorar o enchimento de um reservatório, quando o nível máximo for atingido, e a fonte continua enviando água para o reservatório, neste caso, este indivíduo não será capaz de receber o comando que mudaria a ação de encher o reservatório.

4.1.2.3 Tálamo

Uma estrutura subcortical que se encontra ao lado dos gânglios basais, localiza aproximadamente no centro do cérebro (Figura 43), mais ou menos ao nível dos olhos (junto ao mesencéfalo). Apesar de uma estrutura homogênea, é composta por uma série de áreas menores que parecem funcionar de alguma forma independente. Seu papel é transmitir informações sensoriais que chegam por meio de neurônios que se projetam até a região apropriada do córtex.

Figura 43 – Tálamo.



Fonte: Adaptado de (COMMONS, 2023).

Através das várias partes do tálamo, a maioria das informações sensoriais (incluindo informação somatossensorial, auditiva e visual) é retransmitida dos sistemas sensoriais periféricos aos córtex sensoriais (KELLY, 1991); e de acordo com (ÖHMAN; MINEKA, 2001), acredita-se que as entradas sensoriais talâmicas que vão para a amígdala intermedeiam estímulos intrinsecamente carregados emocionalmente, bem como estímulos grosseiramente resolvidos em geral.

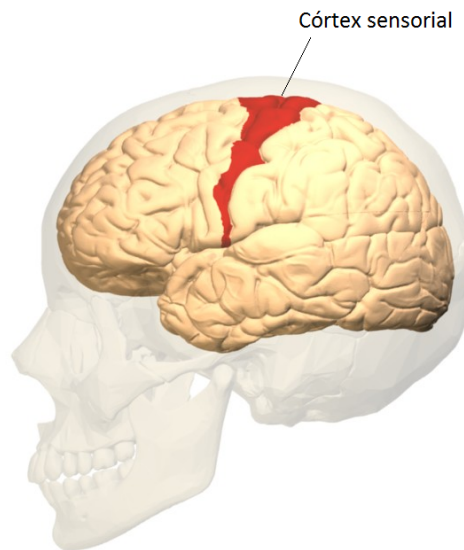
4.1.2.4 Córtex sensorial

O córtex sensorial recebe os sinais através do tálamo e, em seguida, processa essas informações de forma muito ampla para diversos fins. De fato, a informação das áreas sensoriais é extensivamente processada dentro do córtex sensorial. Assim, a amígdala e o córtex orbitofrontal recebem tais informações altamente analisados a partir do córtex sensorial (LEDOUX, 1995; ROLLS, 1995). A Figura 44 mostra a localização do córtex cerebral no cérebro.

4.1.2.5 Hipocampo e hipotálamo

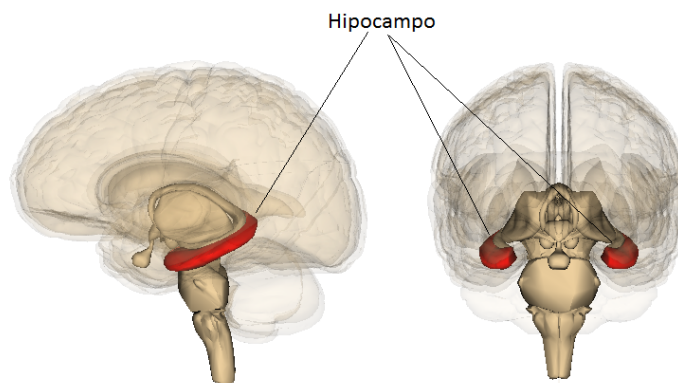
O Hipocampo (Figura 45) é a porção alongada medial do córtex temporal que se localiza para cima e para dentro para formar a superfície ventral do corno inferior do ventrículo lateral. Uma extremidade do hipocampo termina nos núcleos amigdalóides, e também se funde ao longo de uma de suas bordas com o giro parahipocâmpico, que é o córtex da superfície ventromedial do lobo temporal (GUYTON; HALL; GUYTON, 2006).

Figura 44 – Córtex sensorial.



Fonte: Adaptado de (COMMONS, 2023).

Figura 45 – Hipocampo.



Fonte: Adaptado de (COMMONS, 2023).

De acordo com (PITKÄNEN, 2000), observa-se que a amígdala está fortemente interligada com o hipocampo e suas conexões são de moderadas a densas do cubículo da formação do hipocampo para todas as principais áreas da amígdala. Segundo (O'KEEFE; NADEL, 1978), sua teoria do mapa cognitivo⁴, o hipocampo é responsável pelo mapeamento do ambiente, principalmente com base em sugestões ambientais; e tem funções diferente que incluem a navegação espacial, estabelecendo da memória de longo prazo e formação das representações contextuais.

Já o hipotálamo, localiza-se abaixo do tálamo como mostrado na Figura 38, é um centro neural de bastante relevância para a manutenção da homeostase⁵ do organismo. Além

⁴ A teoria sustenta que os animais podem aprender sobre as relações espaciais de objetos e relacionar eventos com o contexto espacial de sua ocorrência em seu sistema nervoso central.

⁵ Processo biológico de regulação que mantém o organismo em constante equilíbrio.

de ser responsável por integrar várias respostas endócrinas, autonômicas e comportamentais que garantem a sobrevivência do indivíduo e a manutenção da espécie. Essas respostas regulam o sistema endócrino (especialmente a glândula hipófise), o sistema nervoso autônomo, bem como a sobrevivência comportamental primária e funções como a fome, a sede e o desejo sexual (SCHACHTER, 1971).

4.1.3 Modelagem matemática do sistema límbico

Ao finalizar os estudos das principais funcionalidades e na forma estrutural do sistema límbico, nesta seção, será apresentado um modelo computacional na engenharia de controle que aproveitasse as características desse sistema, de forma a retratar o aprendizado emocional, ou aproximá-lo, em aplicações de controle com dinâmicas complexas.

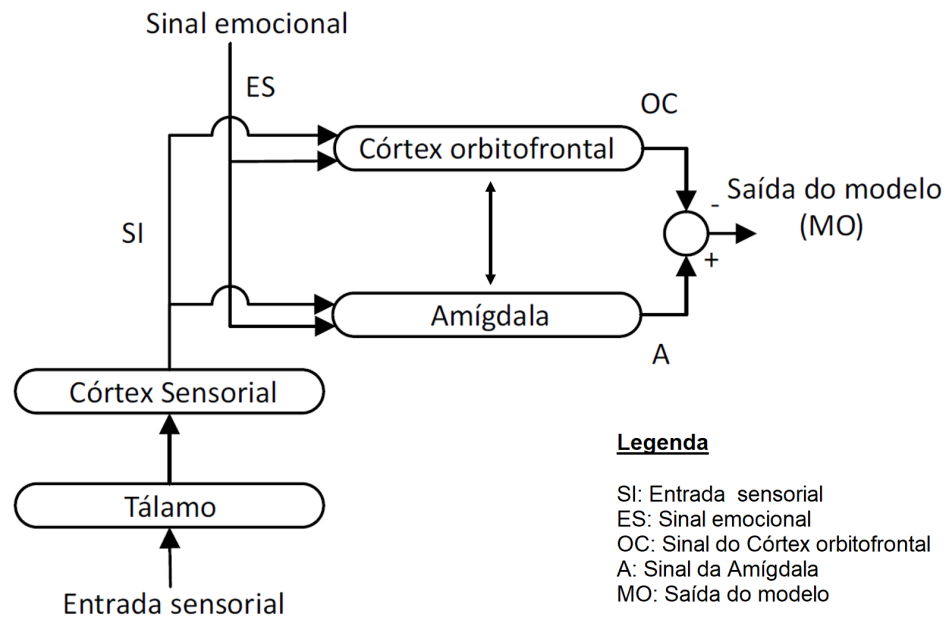
O modelo computacional, do ponto de vista da engenharia, é o resultado de um processo de identificação do sistema: não só a forma funcional identificada, mas também o aprendizado dos valores dos parâmetros. O objetivo é modelar o sistema límbico e usá-lo para fins de engenharia de controle. Não há necessidade de identificar os valores dos parâmetros, pois eles serão definidos pelo problema. Desta forma, como o foco do estudo é uma aplicação do modelo em um sistema de controle, e não nos conceitos biológicos, o modelo estabelecido não incluirá todas as estruturas do sistema límbico, como ilustrados na Figura 41. Assim, o intuito é modelar as estruturas fundamentais que são considerada para o modelo do sistema límbico e suas áreas corticais e subcorticais relacionadas.

O estudo propôs a modelagem das seguintes estruturas: amígdala, córtex orbitofrontal, córtex sensorial e tálamo. Vale salientar que essas duas primeiras estruturas desempenham um papel fundamental no processamento de emoções, enquanto as outras, em grande parte (embora não inteiramente), funcionam como pré-processadores da entrada sensorial.

O modelo proposto por (MOREN, 2002; MORÉN; BALKENIUS, 2000) e apresentado na Figura 46, não é um modelo completo, e sim, um modelo simplista no qual não se pretende representar na sua totalidade a arquitetura límbica. Porém, os autores fornecem resultados de simulações que combinam com dados experimentais descritos no campo da modelagem cerebral. Como observado, duas entradas sensoriais são mostradas, a entrada sensorial (*SI*) proveniente do estímulo registrado nos órgãos sensoriais, e o outro sinal primário que é um sinal emocional (*ES*).

Uma característica fundamental do modelo é que a motivação para responder e a própria resposta são diferentes (HEBB, 1955), permitindo assim um amplo padrão de respostas aos estímulos externos. Assim, a avaliação do estímulo e a escolha das ações a serem tomadas, como resultado da avaliação, estão evidentemente separadas. A afirmação é firmada da biologia, onde a tarefa da amígdala é aprender as associações entre a entrada sensorial e emocional e refleti-las na saída (LEDOUX; FELLOUS, 1995; ROLLS, 2000).

Figura 46 – Estrutura do modelo computacional simplista do sistema límbico.



Fonte: Adaptado de (MOREN; BALKENIUS, 2000).

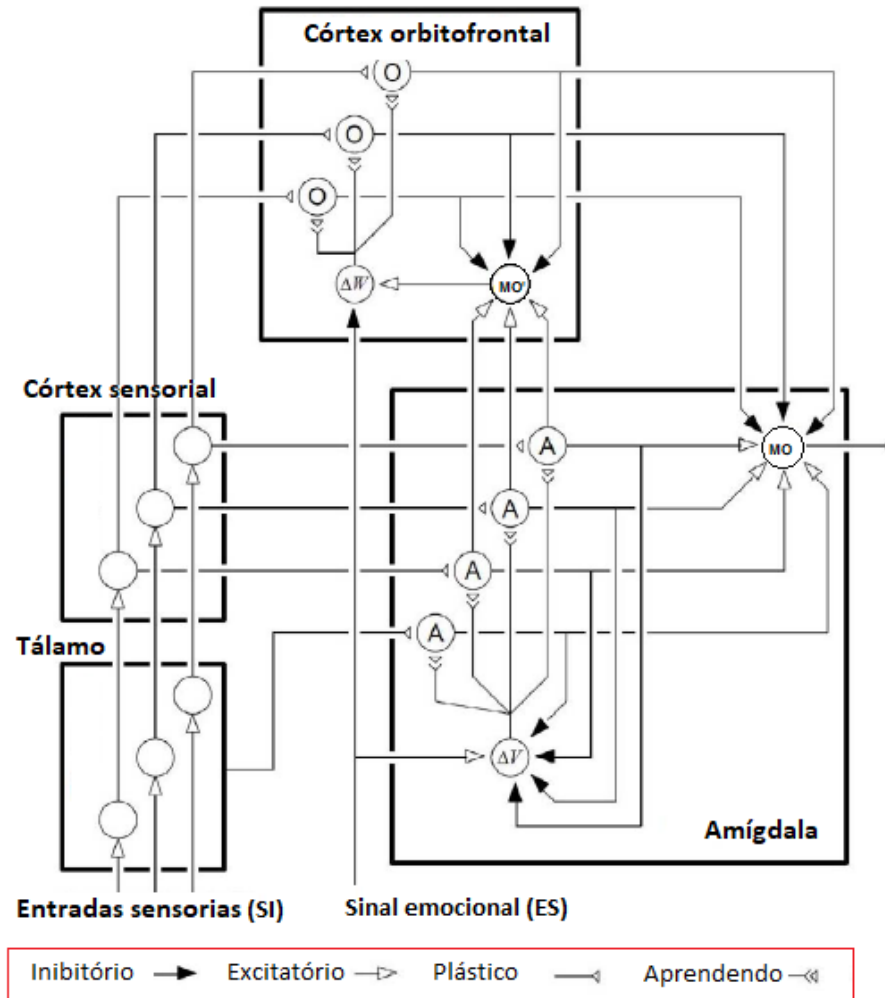
Adicionalmente a afirmação, a tendência do aprendizado da amígdala é monotônica, ou seja, há tendência crescente ou estável (SANGHERA; ROLLS; ROPER-HALL, 1979). Se a experiência é favorável ou desfavorável, a amígdala captura a essência dessa associação e tende a funcionar como base na nova experiência futura. Mas, a ação final gerada pelo sistema límbico possui uma parcela de resposta relacionada ao córtex orbitofrontal (OC – do inglês *orbitofrontal cortex*).

Há um caminho de atalho entre o tálamo e amígdala (A), que será responsável em melhorar a velocidade e as propriedades de tolerância a falhas do modelo, pois ignora o processamento do córtex sensorial mais lento. Com isso, esse atalho permitiu ao modelo gerar uma ação rápida (embora não ótima) chamada de decisão satisfatória. Além de transportar a maior quantidade possível de informações dentro dos múltiplos sinais sensoriais, em caso de um não funcionamento do córtex sensorial devido um excesso de sinais sensoriais contraditórios.

O modelo computacional apresentado (MOREN; BALKENIUS, 2000) consiste em quatro partes principais, como mostrado na Figura 47. Há uma interação entre a amígdala e córtex orbitofrontal em um condicionamento emocional, os sinais da entrada sensorial (SI_i) entram pela primeira vez no tálamo onde é realizado um pré-processamento e em seguida este sinal é enviado ao córtex sensorial e amígdala. O córtex sensorial por sua vez é responsável pela subdivisão e a distinção não refinada da saída do tálamo, e posteriormente esses sinais são enviados para a amígdala e o córtex orbitofrontal (AMARAL, 1992).

Já na fase de passagem pela amígdala, o sinal deverá sofrer uma avaliação "emocional" dos estímulos, sendo essa avaliação utilizada como referência dos estados emocionais. Na etapa final, a estrutura do córtex orbitofrontal tem a função de realizar a inibição das respostas consideradas

Figura 47 – Modelo computacional do aprendizado emocional do sistema límbico.



Fonte: Adaptado de (MOREN; BALKENIUS, 2000).

inapropriadas provenientes da região da amígdala (MOREN, 2002; MOREN; BALKENIUS, 2000).

De forma a obter o sistema de equações para a estrutura do modelo computacional, adotou-se o sinal da amígdala como (A) e o córtex orbitofrontal (OC). Com isso, tem-se que, para cada entrada sensorial recebida pelo modelo (SI_i), existe um nó na amígdala correspondente (A_i) e também nó córtex orbitofrontal (OC_i), que geram as saídas nodais da amígdala e córtex orbitalfrontal. Portanto, estas saídas são geradas pelo produto entre o sinal de entrada sensorial por seus respectivos pesos da amígdala (V) e córtex orbitofrontal (W), resultando em:

$$A_i = V \cdot SI_i \quad (20)$$

$$OC_i = W \cdot SI_i \quad (21)$$

No que diz respeito à estrutura do tálamo, sua característica é fornecer uma rápida (não

ótima) aos estímulos. Essa capacidade fará com que ele passe o sinal máximo entre todas as entradas sensoriais (SI_i) e enviá-la à amígdala como uma entrada (A_{th}) (MOREN, 2002; KELLY, 1991; GRAY, 1995).

$$A_{th} = \max (SI_i) \quad (22)$$

As equações que são compostas com o índice " i ", implicando que seu processamento emocional tem vários *loops* e todas as saídas de *loops* individuais resultarão em um modelo de única saída (MO). Os blocos da amígdala e córtex orbitofrontal possuem, basicamente, pesos adaptativos, que atuam sobre (SI) e esses pesos são atualizados por (ΔV) e (ΔW), dependendo do sinal emocional e outros sinais. O processo de aprendizagem da amígdala e córtex orbitofrontal ocorrem através das suas regras de atualização de pesos internos dada pelas equações (23) e (24):

$$\Delta V = \alpha SI_i \max(0, ES - \sum_i A_i) \quad (23)$$

$$\Delta W = \beta SI_i R_o \quad (24)$$

O termos (α) e (β) são valores constante e, geralmente distintos, entre zero e um, os quais fornecem um parâmetro para o controle da taxa de aprendizado da amígdala e do córtex orbitofrontal, respectivamente. Na fase de atualização dos pesos, no peso da amígdala (V) observa-se na Equação (23) que este valor nunca será negativo, ou seja, o valor absoluto do (V) é sempre crescente, em decorrência do termo " $\max$ " da Equação (23) faz com que as mudanças de aprendizagem sejam monotônicas, de modo que o ganho da amígdala nunca diminua. Esta regra implica, quando modelado o sistema, incapacidade de desativar o sinal de emoção (e, conseqüentemente, a ação emocional) anteriormente aprendidas na amígdala (BALKENIUS; MORÉN, 1998).

O fato é condizente com afirmação de (BALKENIUS; MORÉN, 1998), pois uma vez aprendida uma reação emocional, esta deverá ser permanente, sendo a função do córtex orbitofrontal realizar sua inibição, caso esta seja inadequada. Por outro lado, o peso do córtex orbitofrontal (W) tem regra de atualização semelhante ao caso da amígdala, diferenciando-se no tocante a variação de aumentar e diminuir conforme necessário, de forma a realizar a inibição necessária do sinal emocional.

Dada a Equação (24), o termo (R_o) é chamado de reforço interno para o córtex orbitofrontal, podendo assumir valores distintos, a depender das condições que satisfaz com base no valor do sinal emocional (ES).

$$R_o = \begin{cases} \text{máx}(0, \sum_i A_i - ES) - \sum_i OC_i & \forall \quad ES \neq 0 \\ \text{máx}(0, \sum_i A_i - \sum_i OC_i) & \forall \quad ES = 0 \end{cases} \quad (25)$$

A partir do momento que há uma recompensa, o reforço interno (R_o), representa a diferença entre a recompensa e as saídas da amígdala (A_i) menos a saída do córtex orbitofrontal (OC_i). Porém, se não houver recompensa, o córtex se comporta de forma diferente, onde o (R_o) será o excedente das saídas de amígdala sobre as saídas do córtex (OC_i), como mostrado na Equação (25).

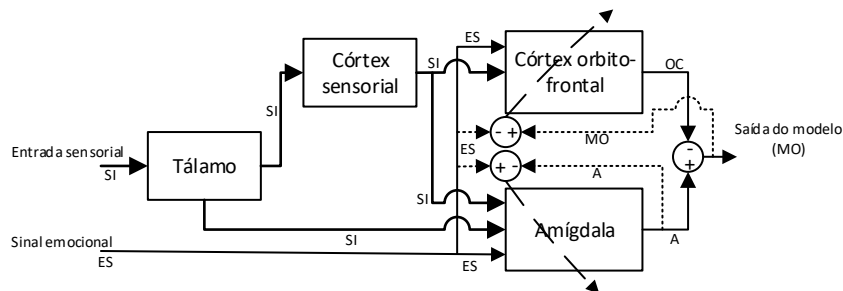
Ao final do processo, com base na modelo computacional, mostrado na Figura 47, é possível equacionar a saída do modelo (do inglês *model output* – MO), comum a todas as saídas do modelo, é simplesmente a diferença entre os somatórios das saídas dos (A_i – saídas excitatórias) e (OC_i – saídas inibitórias), respectivamente, sendo este o resultado do modelo representado pela Equação (26). Outra representação do modelo através de diagrama de blocos pode ser visto na Figura 48.

$$MO = \sum_i A_i - \sum_i OC_i \quad (\text{inclui } A_{th}) \quad (26)$$

Analogamente, o nó (MO') soma as saídas de excitatórias (A_i), exceto (A_{th}), em seguida, subtrai das saídas inibitórias dos nós (OC_i), representada pela equação:

$$MO' = \sum_i A_i - \sum_i OC_i \quad (\text{não inclui } A_{th}) \quad (27)$$

Figura 48 – Estrutura do modelo emocional do cérebro baseada na amígdala.



Fonte: Adaptado de (BEHESHTI; HASHIM, 2010).

4.1.4 Definição dos sinais emocionais e estímulos sensoriais

Ao longo da descrição desse modelo, a utilização do aprendizado emocional em engenharia de controle foi justificada. Neste contexto, o primeiro problema em usar o modelo para uma configuração do sistema de controle é a forma de incorporá-lo na arquitetura global do sistema, pois não há uma maneira única de fazer isso, conforme já mencionado, por ser uma característica fundamental do modelo proposto, a sua flexibilidade em receber diferentes estímulos sensoriais e sinais emocionais.

A teoria desenvolvida fomenta que o aspecto do aprendizado deste tipo de controlador é centrada no módulo de aprendizagem emocional, o qual (LUCAS; SHAHMIRZADI; SHEIKHOLESLAMI, 2004) em seus trabalhos relacionaram a possibilidade deste módulo possuir aplicações adequadas para a engenharia de controle, no qual os sinais (*SI*) e (*ES*) fornecem ao módulo BEL a capacidade de torná-lo perceptível às mudanças do sistema dinâmico e, além disso, contribuem para atingir os objetivos de controle. Ao se tratar do projeto do controlador BELBIC, associa-se à velocidade e ao ganho da resposta dinâmica o (*SI*), por outro lado, o (*ES*) está diretamente relacionado à dinâmica de desempenho deste controlador.

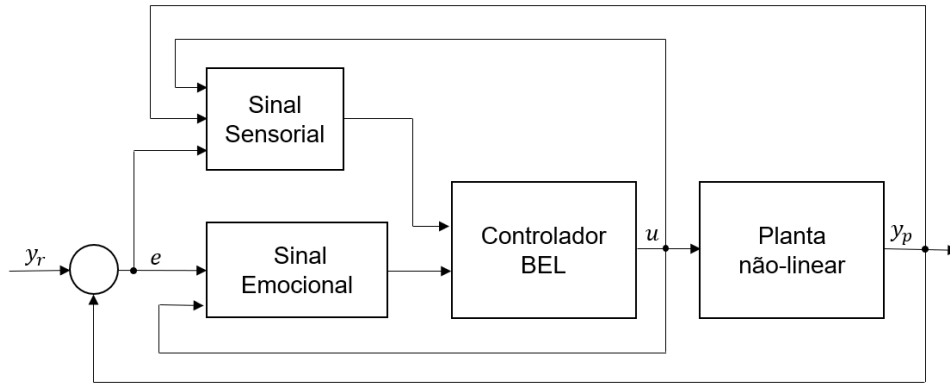
Uma característica relevante do controlador BELBIC, que o torna eficaz, é a sua flexibilidade na composição de (*SI*) e (*ES*) que fica a critério do projetista a partir do conhecimento da dinâmica da planta (sistema) e de possíveis ensaios experimentais possibilitando obter tais sinais sensoriais e emocionais. Nesse sentido, pode-se optar por um conjunto de diferentes arquiteturas para ambos os sinais, como por exemplo, as diferentes variáveis da malha de controle a qual o BELBIC está inserido.

Nos trabalhos de (MILASI; LUCAS; ARAABI, 2005; ROUHANI; MILASI; LUCAS, 2005; MEHRABIAN; LUCAS; ROSHANIAN, 2006; MEHRABIAN; LUCAS, 2006; VALIZADEH; JAMALI; LUCAS, 2008; DARYABEIGI et al., 2009; DARYABEIGI; MARKADEH; LUCAS, 2010; MARKADEH et al., 2011), o modelo do BELBIC não é diferente do modelo de qualquer outro sistema não linear e controle adaptativo; onde foi mencionado que o controlador baseado em BEL deve ser fornecido com um conjunto de sinal de entrada sensorial(*SI*) e um sinal de emocional(*ES*).

Considerando que o mecanismo de aprendizado emocional nos mamíferos é um sistema de aprendizado em malha aberta e receberá estímulos externos (ambiente), a eficácia desta reação é avaliada no sinal de reforço e produzam melhores respostas ao estímulo. Para usar este algoritmo na tomada de decisão e aplicações de controle, um esquema de malha fechada deve ser introduzido - como apresentados em (MEHRABIAN; LUCAS; ROSHANIAN, 2006; MEHRABIAN; LUCAS, 2006; MARKADEH et al., 2011), que sugere um diagrama de blocos mostrado na Figura 49.

Como equacionado em (28), (29), o sinal sensorial e o sinal emocional, geralmente podem ser arbitrários através da função de saída de referência, (y_r), saída do controlador (u) e

Figura 49 – Configuração do sistema de controle usando BELBIC.



Fonte: Adaptado de (MEHRABIAN; LUCAS; ROSHANIAN, 2006; MEHRABIAN; LUCAS, 2006; MARKADEH et al., 2011).

sinal de erro (e), e com isso o projetista deve encontrar uma função adequada para o controlador.

Os sinais para o aprendizado emocional são um conjunto de sinais de entrada, bem como um sinal de reforço. Esses sinais geralmente podem ser arbitrariamente escolhidos ao critério do projetista, como mencionado anteriormente. Recomenda-se que o sinal emocional seja uma função de outros sinais que podem ser supostamente como uma lógica de uma função de custo, especificamente ganhos e punições:

$$ES = g(SI_i, e, y_p) \quad (28)$$

onde (y_p) é a saída da planta, y_r é o sinal de referência e (e) é o sinal de erro. Da mesma forma, os sinais sensoriais devem ser uma função das saídas da planta e das saídas do controlador, formulada da seguinte forma:

$$SI_i = f(u, e, y_p, y_r) \quad (29)$$

A configuração geral do BELBIC é mostrada na Figura 49. A principal dificuldade associada ao BELBIC é a seleção de sinal sensorial e o sinal de emocional para o controlador. Os autores (MEHRABIAN; LUCAS; ROSHANIAN, 2006; MEHRABIAN; LUCAS, 2006; MARKADEH et al., 2011) sugerem a função do sinal emocional (ES) da seguinte forma:

$$ES_i = k_1 e + k_2 \frac{d}{dt} e + k_3 \int e \cdot dt \quad (30)$$

Já o sinal de entrada sensorial (SI) formulado em termos de:

$$SI_i = k_4 |e| + k_5 |e \cdot u| + k_6 |y_p| \quad (31)$$

onde e , u , y_p representam referência de sinal de erro, sinal de controle e saída da planta, respectivamente. Além disso, k_1 a k_6 são os ganhos, que devem ser ajustados posteriormente para um controle satisfatório do sistema.

No que diz respeito à operação do controlador, o (ES) é a combinação ponderada do erro e sua integral. Como era esperado, há uma certa flexibilidade em gerar o sinal emocional escolhendo as tendências emocionais, que pode decidir implicitamente aos objetivos de controle. Já a entrada sensorial é escolhida como a combinação do erro, do sinal de controle e o da saída da planta, tornando o sistema mais sensível a uma mudança do seu estado. Logo, as equações obtidas são (30) para o sinal emocional e (31) para a entrada sensorial.

Os parâmetros (k_1) a (k_6) são os pesos associados aos sinais acima mencionados. Esses parâmetros (k) serão estimados inicialmente empiricamente, com base em simulações e, posteriormente, uma técnica de otimização baseada em enxame de partículas será utilizada para otimizar os valores desses parâmetros. Como o controlador possui vários parâmetros, a possibilidade trará ao controle a liberdade para escolher o que se adequa à melhor resposta com base na função objetivo.

4.2 Otimização por Enxame de Partículas

As técnicas clássicas nem sempre garantem uma boa sintonia de controladores, resultando em alguns casos ações indesejadas (tais como sobressinais e longos períodos de acomodação). Sendo assim, uma alternativa que tem sido considerada em alguns trabalhos é a aplicação de metaheurística para a otimização dos ganhos do controlador (CHEN, 2007; OI et al., 2008). Estes métodos auxiliam encontrar soluções de problemas de otimização (comumente encontrados em engenharia) por simples operações de julgamento, reduzindo sua complexidade e proporcionando soluções próximas as desejadas e considerando soluções relativamente ótimas (VALERDI, 2010).

As técnicas de computação (programação) evolucionária (FOGEL, 1994), os algoritmos genéticos (GOLBERG, 1989), as estratégias evolucionárias (KOZA, 1992) e programação genética (ZURADA et al., 1994) são motivadas pela evolução da natureza. Considerando uma população de indivíduos, os quais representam as possíveis soluções para o problema, estas são manipuladas, de acordo com as regras de sobrevivência impostas, que melhor se adaptam aos operadores genéticos, tais como mutação, cruzamento e reprodução. A melhor solução considerada evolui através das gerações. Essas técnicas vêm sendo amplamente aplicadas com sucesso em muitas áreas do conhecimento e, mais especificamente, em problemas envolvendo otimização.

Baseando-se nas técnicas evolucionárias, a otimização por enxame de partículas, foi inicialmente proposta por James Kennedy e Russell Eberhart (EBERHART; KENNEDY, 1995), a princípio como um modelo para otimização de funções contínuas não-lineares. O PSO é inspirado na simulação do comportamento social de um bando de pássaros em revoada, com movimento

localmente aleatório, mas globalmente determinado. Assim como em outros algoritmos, existe uma população de indivíduos, chamados de enxame ou nuvem de partículas, que ao invés de utilizar operadores genéticos, evoluem através da cooperação e competição, entre si, por diversas gerações. Essas partículas se beneficiam de sua própria experiência e da experiência de outros membros do enxame durante a busca de uma melhor função *fitness* (função que será apresentada posteriormente), os exemplos do alvo: comida, local para pouso, proteção de predadores, etc).

4.2.1 Os termos utilizados no algoritmo PSO

Para facilitar a compreensão do algoritmo, uma breve explicação dos termos que serão utilizados faz-se necessário e descritos abaixo.

- Partículas ou agentes: as partículas do exame atuam individualmente tendendo a acelerar em direção à melhor localização pessoal e global, sempre verificando o valor da sua atual localização.
- Posição: representado por coordenadas no plano ($x - y$). Analogamente ao exame, seria o lugar onde a espécie está localizada no campo. O espaço de n -dimensões será o espaço de solução, onde qualquer conjunto de coordenadas representa uma possível solução.
- Aptidão: responsável por avaliar quão boa é a posição local de cada partícula. Deve tomar a posição no espaço de solução e retornar um único número que representa o valor dessa posição.
- *pbest*: considerado o melhor local individualmente encontrado. Cada partícula do enxame tem seu próprio *pbest* determinada pelo caminho percorrido. Em cada ponto ao longo do caminho a partícula compara o valor da aptidão de seu local atual com o *pbest*, caso seja maior, o *pbest* é atualizado para a localização atual.
- *gbest*: visto como o melhor local global, ou seja, maior aptidão encontrada. Para o enxame inteiro há uma *gbest* para onde cada partícula é atraída. Em cada ponto ao longo do percurso, cada partícula compara a adequação de seu local atual com a *gbest*. Em alguns casos, se alguma partícula está em um local de maior aptidão em relação ao enxame inteiro este passa a ser o *gbest*.

4.2.2 Estrutura do algoritmo

Em sua versão original, o PSO assemelha-se a algumas técnicas da computação evolucionária, como os algoritmos genéticos (do inglês *Genetic Algorithm* – GA), no qual o sistema é inicializado randomicamente com uma população de soluções. Entretanto, difere dessas outras técnicas populacionais, visto que nenhum operador inspirado pelos procedimentos de DNA, aplica-se na população, para obtenção de uma nova geração de indivíduos. Como não há mutação, são utilizadas partículas, que se movendo em um espaço de busca n -dimensional,

sendo cada uma partícula uma possível solução do problema. Cada partícula possui também uma velocidade randômica, para que possa percorrer o espaço de soluções do problema.

O primeiro passo do algoritmo é criar uma população inicial(enxame) de tamanho N e dimensão D exposta da forma $X = [X_1, X_2, \dots, X_N]^T$, onde " T " é o operador transposto. Cada indivíduo (partícula) $X_i = (i = 1, 2, \dots, N)$ é dado como $X_i = [X_{i,1}, X_{i,2}, \dots, X_{i,D}]$. Além disso, a velocidade inicial da população é dada por $V = [V_1, V_2, \dots, V_N]^T$. Assim, a velocidade de cada partícula $X_i = (i = 1, 2, \dots, N)$ é dada como $V_i = [V_{i,1}, V_{i,2}, \dots, V_{i,D}]$. O índice " i " pode variar entre 1 a N e o índice " j " varia de 1 a D .

A velocidade da partícula, é o elemento central de toda a otimização, sendo ela alterada de acordo com a posição relativa de $pbest$ e $gbest$. E partículas são aceleradas nas direções destes locais de maior aptidão de acordo com a Equação 33; e seu resultado será uma nova velocidade, fazendo com que este vetor de velocidade seja o responsável por impulsionar a otimização e refletir tanto o conhecimento experiencial das partículas e suas informações trocadas socialmente pelo enxame de partículas. O conhecimento experiencial de uma partícula é referido como componente cognitivo, que é proporcional à distância da própria partícula de sua melhor posição. Já a informação socialmente trocada é referida como componente social da equação velocidade.

O valor do termo c_1 (taxa cognitiva) é fator determinante de quanto a partícula é influenciada pela memória de sua melhor localização. O aumento dela causará a exploração do espaço de soluções que cada partícula se move em direção a sua própria $pbest$. Já o c_2 (taxa social) é um fator determinante de quanto a partícula é influenciada pelo resto do enxame. Aumentar c_2 estimula o aumento da exploração de um possível máximo global.

A escolha dos parâmetros c_1 e c_2 foram sugeridas pelo próprios desenvolvedores do PSO, como sendo o $c_1 = 2$ e $c_2 = 2$, a fim de manter um equilíbrio sobre a influência do aprendizado individual e social, no comportamento atual da partícula (SHI; EBERHART, 1998). Além desses parâmetros, como mostrado na Equação 33, os valores aleatórios estão compreendidos entre $[0,1]$, amostrados numa distribuição uniforme, sendo estes valores aleatórios os responsáveis por introduzirem um elemento estocástico para o algoritmo.

O peso inercial (w) é responsável por determinar que medida a partícula permanece ao longo do seu caminho original afetado pela força da $pbest$ e $gbest$. As partículas mais distantes da $gbest$ e $pbest$ são atraídas por parte dos respectivos locais, e, assim, avançam em direção a eles com maior rapidez. Elas continuam ganhando velocidade na direção dos locais de maior aptidão até passarem por cima deles, consequentemente, começam a ser atraídas para trás na direção oposta ("sobrevôo"). Percebendo a exploração inicial e começam progredir e aumentar a exploração rapidamente. É sugerido que o valor do peso inercial variasse linearmente entre 0,9-1,2 (SHI; EBERHART, 1998).

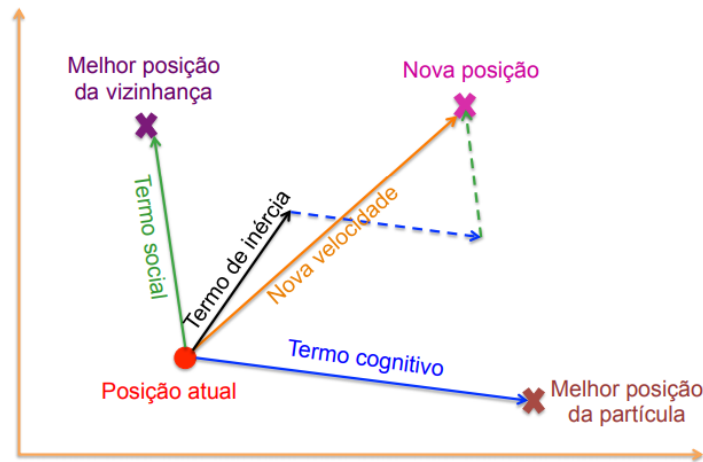
Ao considerar que a velocidade já foi determinada, mover cada partícula ao seu próximo local é uma tarefa simples e novas coordenadas x_n são calculadas para cada uma das N dimensões

de acordo com a Equação 34. Sendo assim, a nova partícula é então movida para o novo local calculado.

Após a finalização deste processo para cada partícula do enxame, o mesmo é repetido. Agora as posições de todas as partículas são avaliadas e as atualizações de $pbest$ e $gbest$ são realizadas para que as partículas possam continuar suas buscas. Portanto, este ciclo repete-se até satisfazer os critérios de parada, que neste caso, será o número máximo de iterações. A aplicação desse critério deve ser tomada de forma cautelosa na escolha de um número razoável de iterações, pois quando o número é grande, o PSO pode estagnar aguardando a diminuição do w para iniciar a exploração máxima. Outrossim, um número pequeno de iterações pode resultar na exploração dos máximos locais antes mesmo que o enxame consiga explorar de forma adequada o espaço de soluções e encontrar o máximo global.

A Figura 50 apresenta de forma geral, o modo de funcionamento do algoritmo PSO, as parcelas dos fatores cognitivo e social, contribuindo para o deslocamento da partícula.

Figura 50 – Movimentação das partículas PSO.

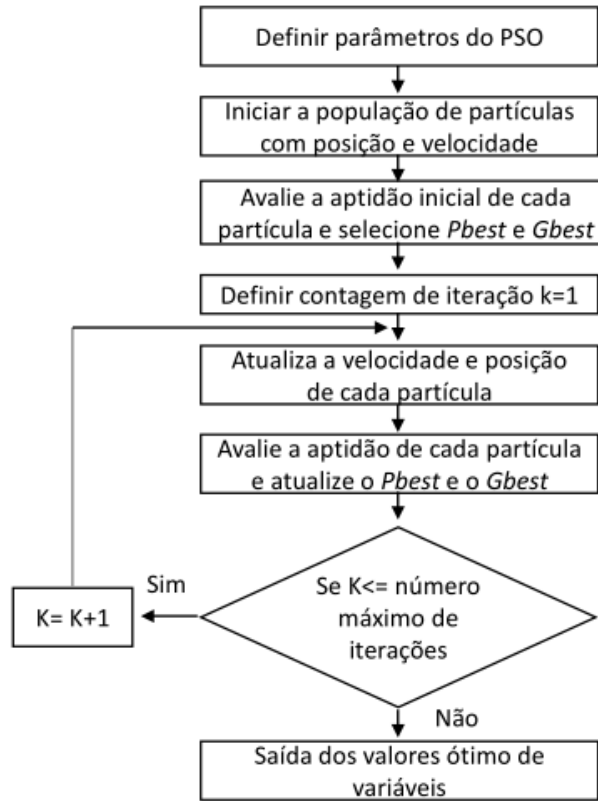


Fonte: Adaptado (NADIA, 2013).

A implementação do algoritmo, baseado no fluxograma da Figura 51, segue os passos enumerados a seguir:

1. Defina o parâmetro w_{min} , w_{max} , c_1 e c_2 do PSO.
2. Inicialize a posição e a velocidade das partículas de forma aleatória dentro dos limites estabelecidos.
3. Defina iteração $k = 1$.
4. Calcule a aptidão das partículas $F_i^k = f(X_i^k), \forall i$ e encontre o índice da melhor partícula b .
5. Selecione $pbest_i^k = X_i^k, \forall i$ e $gbest^k = X_b^k$.

Figura 51 – Fluxograma do PSO.



Fonte: Próprio autor.

6. Cálculo do peso inercial

$$w = w_{max} - k(w_{max} - w_{min}) / \text{número máximo de iterações}. \quad (32)$$

7. Atualize a velocidade das partículas de acordo com a equação:

$$v_{i,j}^{k+1} = wv_{i,j}^k + c_1 \text{rand}() (pbest_{i,j}^k - X_{i,j}^k) + c_2 \text{rand}() (gbest_j^k - X_{i,j}^k) \quad (33)$$

8. Atualize a posição da partícula de acordo com a equação:

$$x_{i,j}^{k+1} = x_{i,j}^k + v_{i,j}^{k+1}, \forall j \text{ e } \forall i \quad (34)$$

9. Avalie a aptidão $F_i^{k+1} = f(X_i^{k+1})$, $\forall i$ e encontre o índice da melhor partícula $b1$.10. Atualize $pbest$ de população $\forall i$

se $F_i^{k+1} < F_i^k$ então $pbest_i^{k+1} = X_i^{k+1}$. Senão, $pbest_i^{k+1} = pbest_i^k$

11. Atualize $Gbest$ da população

se $F_{b1}^{k+1} < F_b^k$ então $gbest^{k+1} = pbest_{b1}^{k+1}$ e definir $b = b1$ senão $gbest^{k+1} = gbest^k$

12. Se $k < \text{número máximo de iterações}$ então $k = k + 1$ e vá para o passo 6. Senão, vá para o passo 13.
13. Saída da solução ideal como $gbest^k$

Ao se compreender os conceitos básicos do PSO, desenvolveu-se um código no ambiente computacional MATLAB®, com base no fluxograma apresentado na Figura 51, para a execução do algoritmo de otimização aplicado ao sistema proposto na tese. A utilização do PSO para estimativa dos parâmetros do BELBIC requer modelar uma função que melhor corresponda ao objetivo do problema. Para compor a equação, será utilizado o índice desempenho *Integrated Absolute Error* (IAE) - Equação 35. Este índice é um dos mais utilizados, principalmente por obter bons resultados experimentais de implementação computacional. Um sistema projetado a partir deste critério tem como característica um amortecimento razoável, isto é, apresenta uma boa resposta transitória, e sobressinal não muito oscilatório. Segundo (KATSUHIKO, 2010) os critérios baseados em função da integral do erro do sistema integram uma forma mais clássica de avaliação do desempenho de uma malha de controle, além dos parâmetros da resposta transitória ao degrau do sistema.

$$IAE = \int_0^T |e(t)| dt \quad (35)$$

Diante do índice estabelecido, que é definido como um problema que precisa ser otimizado, a função objetivo do problema (J) não será composta exclusivamente apenas pelo índice de desempenho (IAE), mas por uma função que pondere índices compostos. Esta é uma avaliação clássica para problemas de avaliação e otimização quando há múltiplos aspectos relevantes.

Nessa tese, o índice de desempenho escolhido e suas respectivas ponderações que compõem a função objetivo do problema de otimização ocorreu de forma analítica e experimental, baseados no conhecimento do problema. A saber, os índices são: IAE, t_{in} e t_{var} . Os pesos da equação foram obtidos de maneira empírica de acordo com resultados de simulações. A função objetivo do problema é dada de acordo com a seguinte equação:

$$J(k) = \sum_{k=1}^N |e(k)| + 100 * t_{in} + 200 * t_{var} \quad (36)$$

Em que t_{in} é valor máximo no transitório inicial da simulação e t_{var} o valor máximo no segundo instante de tempo t das variações que serão consideradas ao longo das condições dos cenários de simulação.

4.3 Conclusão do capítulo

No capítulo foram descritos os principais componentes do sistema límbico como: tálamo, córtex sensorial, córtex orbitofrontal e amígdala; além do modelo computacional e suas respectivas equações que regem o controlador BELBIC. Também foram exploradas a teoria e equacionamento da técnica de otimização PSO, para que se tenha entendimento suficiente para aplicar o método na estimativa dos parâmetros do controlador BELBIC e PI, utilizando otimização da função objetivo (Equação 36). Assim, o capítulo serviu de embasamento teórico para as aplicações e análises dos resultados que serão obtidos no próximo capítulo.

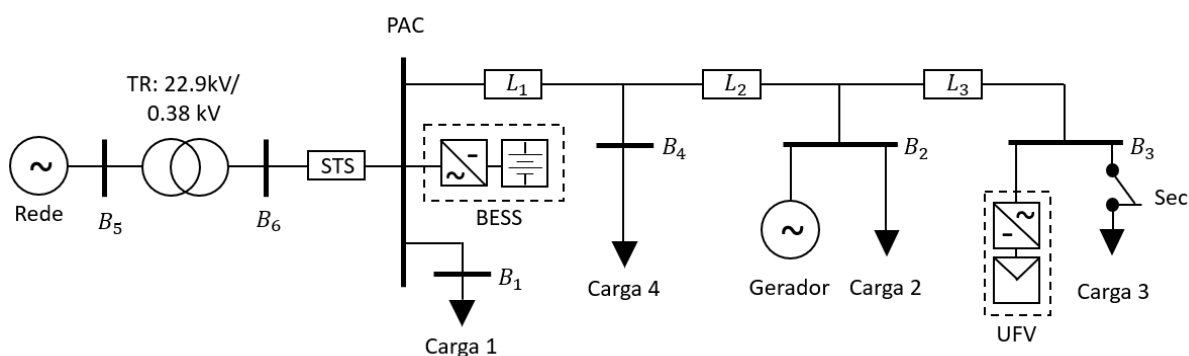
5 MODELOS, CONTROLES, PARÂMETROS E AJUSTES DA MR

O presente capítulo tem por objetivo utilizar os modelos desenvolvidos para realizar simulações no modo ilhado da MR nos cenários propostos. Inicialmente, é apresentada a topologia da MR utilizada nas simulações, incluindo os RED e os demais elementos que às compõe. Além disso, são definidos os principais parâmetros nominais da MR e dos RED. Em seguida, são apresentadas as estruturas de controle *droop*, como controle primário, e os controladores propostos PI e/ou BELBIC como controles primários e secundários. Também incluso ao capítulo, a estrutura proposta para o controle interno e metodologia utilizada diante do processo de escolha da região chamada de *deadzone*, esta definida com base em normas já citadas na Seção 2.5. Por fim, é explorando a implementação da MR e, de forma detalhada, o controlador BELBIC no ambiente computacional *Matlab/Simulink*.

5.1 Estrutura da MR

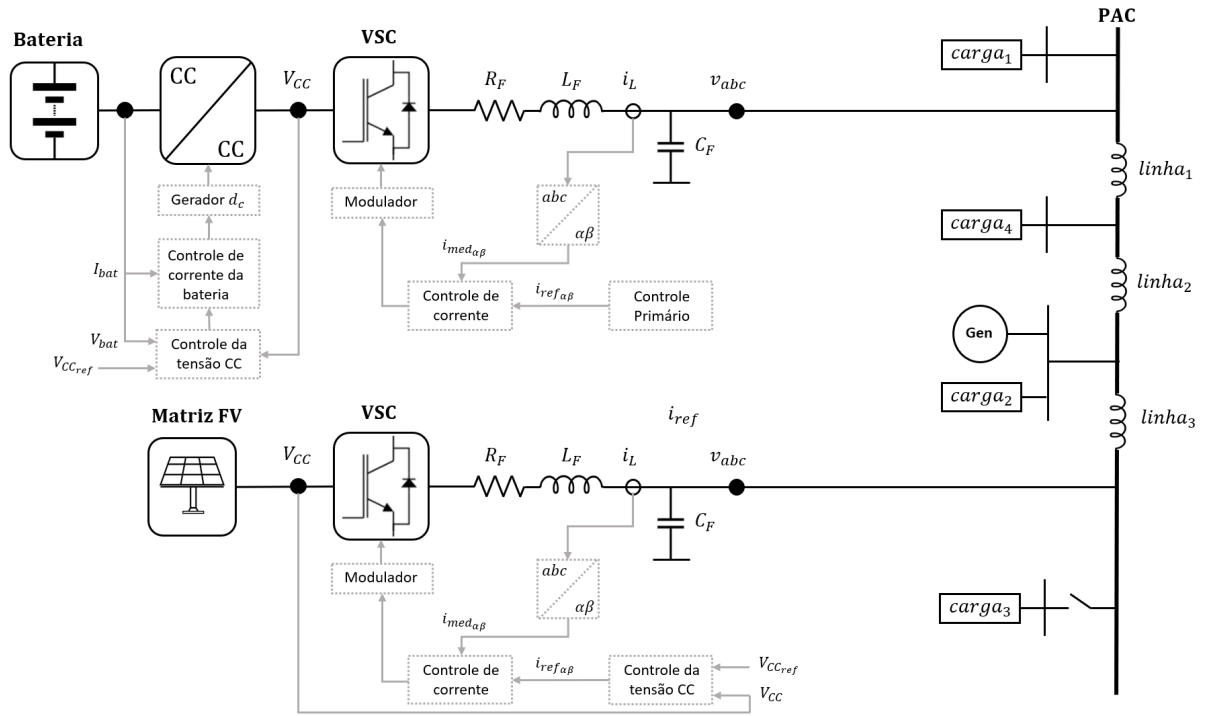
O modelo de Microrrede analisado é apresentado nas Figuras 52 e 53, no qual foi implementada em *MATLAB/Simulink* e cujo desenvolvimento possibilitará avaliar o comportamento dinâmico da MR. A rede principal é modelada por uma fonte alternada trifásica de capacidade de potência superior à MR. A delimitação dar-se através do PAC, que conecta à barra (B_6) e por sua vez está conectada à rede principal através de um transformador.

Figura 52 – Estrutura Elétrica MR implementada para simulações.



Fonte: Próprio autor.

Figura 53 – Estrutura das conexões da MR implementada.



Fonte: Próprio autor.

Os RED utilizados na MR são BESS e sistemas FV, nos quais foram modelados conforme demonstrado nas Subseções 3.3.1 e 3.3.2, respectivamente. As fontes primárias podem ser modeladas na forma completa, por modelos de baterias e módulos fotovoltaicos ou por fontes CC ideais. Os conversores eletrônicos dos RED podem ser modelados para simular o modelo de valores médios ou modelo chaveado. Na Figura 33, estes modelos são definidos e comparados para escolha do modelo adequado para este trabalho. As cargas são modeladas como cargas independentes compostas por um indutor em série com um resistor. A Tabela 20 apresenta os valores nominais dos parâmetros dos elementos da MR e os valores nominais da rede principal e transformador.

Na Seção 3.2.5, foi apresentado a operação dos RED despacháveis no modo *grid-supporting* compartilhando potência ativa e reativa dispensando os canais de comunicação entre as MRs. Ao utilizar conversores operando neste modo, não há necessidade de utilizar algum conversor operando no modo *grid-forming*. Se, pelo menos, um deles for controlado em tensão. Porém, o controle primário através do método *droop* dos conversores - no modo *grid-supporting* - irá produzir um erro em regime permanente na tensão e frequência da MR na operação ilhada, levando à necessidade de implementação do controle secundário para correção do erro. Na Seção 2.10.1 foi abordado o controle *droop*.

A Figura 54 traz o modo de operação *grid-supporting*, nele o conversor opera como controle primário utilizando o controle *droop* e com isso possibilita o controle à nível hierárquico

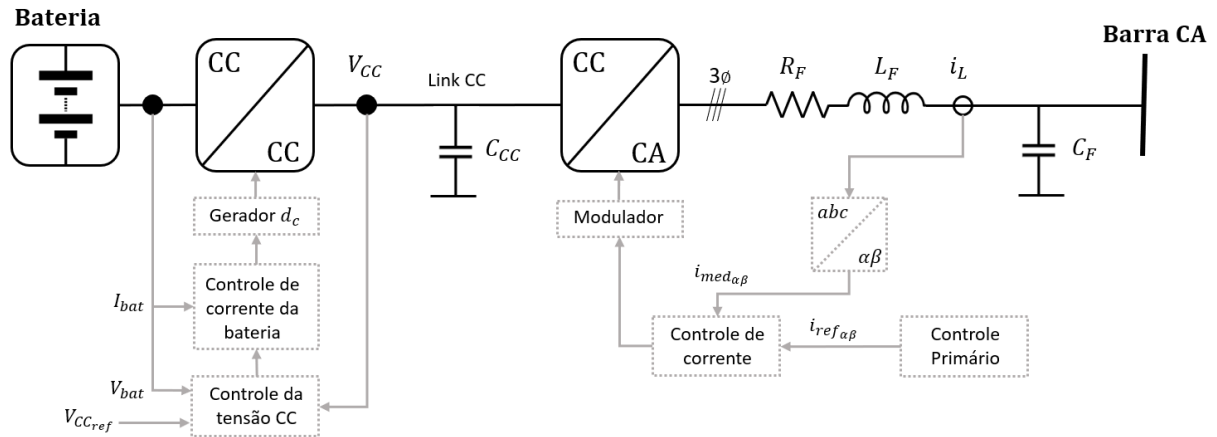
Tabela 20 – Detalhes do sistema da MR.

Itens	Descrição e Parâmetros	Valores
Configuração do sistema	Gerador a diesel	50kVA
	RES: Fotovoltaico	39kVA
	BESS:Sistema de armazenamento	50kW
	Carga:Impedância constante	
	STS: Chave de interconexão	
Transformador Trifásico	Tensão	22.9/0.38kV
	Potência nominal	500kVA
	Reatância	6%
Parâmetros da MR	Tensão nominal	380V
	Frequência nominal	60Hz
Linha	L_1 - 300 metros	$R = 0.198\Omega/Km$
	L_2 - 200 metros	$X = 0.1089\Omega/Km$
	L_3 - 150 metros	
Cargas	Carga 1	50kW + j10kVar
	Carga 2	5kW
	Carga 3	20kW + j5kVar
	Carga 4	5kW + j2kVar

da MR. Também observa-se que a corrente na saída do conversor é medida e transformada para o referencial $\alpha\beta$, mostrado na Seção 3.2.2 do modelo do VSC.

Assim, os modelos adotados para as fontes de geração que apresentam conversores eletrônicos de potência distinguem apenas por suas malhas de controles, a depender do tipo de fontes de geração, sejam elas intermitentes ou despacháveis. Ao tratar das fontes intermitentes (sistema fotovoltaico e gerador eólico – na tese apenas a fotovoltaica) operam no modo PQ , ou seja, suas malhas de controle têm o objetivo de extrair a máxima potência ativa que pode ser obtida dos RED e potência reativa segue o valor pré-definido. Já para as fontes despacháveis, representada nessa MR pelo BESS, opera no modo V/f , em que o controle segue uma referência do erro da frequência (YAZDANI; IRAVANI, 2010).

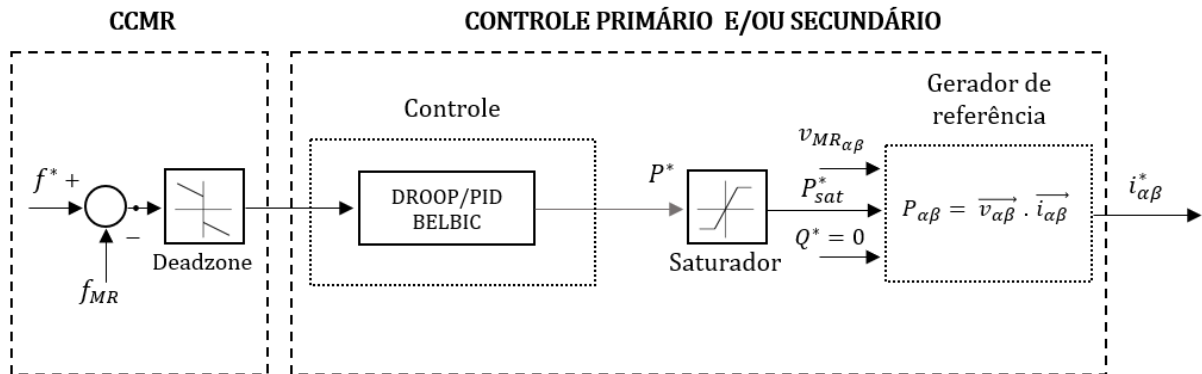
A estrutura de controle para o conversor é apresentada na Figura 54. Essa é composta por três malhas de controle principais. A malha de controle de corrente, que é presente em ambos os modos de operação do inversor (PQ ou V/f) e responsável por gerar os sinais modulantes; a malha de controle interno - apresentado na Seção 3.2.4; e a malha de controle *droop*. Porém, outras malhas de controle que geralmente são utilizadas não serão apresentadas no trabalho, que são elas: a malha de controle de potência que aplica-se somente no modo PQ e a malha de controle de tensão aplicada somente no modo V/f .

Figura 54 – Topologia do controle *droop* aplicado ao VSC controlado por corrente associado ao BESS.

Fonte: Próprio autor.

A Figura 55 ilustra o diagrama de blocos dos controles propostos que serão utilizados para as três técnicas de controle *droop*, PI e BELBIC que serão apresentadas a seguir.

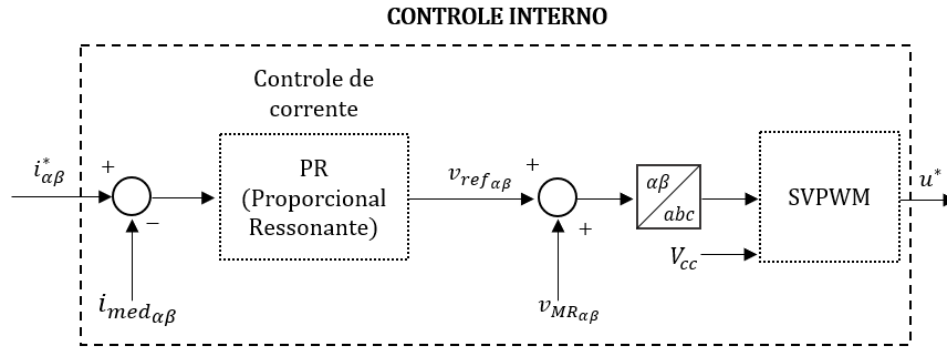
Figura 55 – Estrutura do CCMR e controle primário.



Fonte: Próprio autor.

Como observado na Figura 55, o CCMR será responsável em definir ($f^* = 60\text{Hz}$ – Brasil) e receber o valor da frequência (f_{MR}), com base no valor medido no gerador – que dita a frequência. Posteriormente, o controle primário gera um valor de corrente ($i_{\alpha\beta}^*$) para o controle interno, apresentando na Figura 56 e descrito detalhadamente na Seção 3.2.4.

Figura 56 – Estrutura de controle interno.

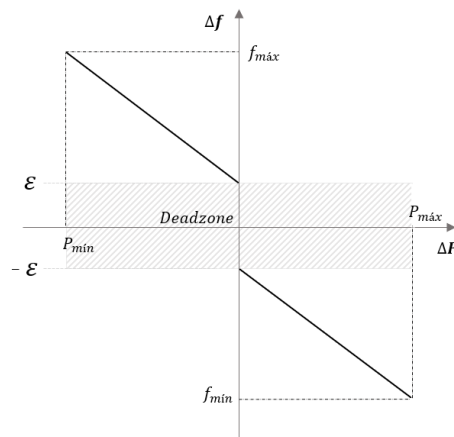


Fonte: Próprio autor.

Além disso, a saída de controle (que defini a referência de potência a ser injetada ou absorvida) passa por um saturador, que estabelece os limites de potência do BESS. Também, o bloco gerador de referência, que possui entradas ($v_{MR_{\alpha\beta}}$) e (P_{sat}^*), utiliza a Equação 37 para o cálculo da corrente ($i_{\alpha\beta}^*$).

$$i_{\alpha\beta}^* = \begin{cases} i_{\alpha}^* = \frac{2}{3} \left(\frac{v_{a\alpha} \cdot p_{\alpha} - v_{b\alpha} \cdot q_{\alpha}}{v_{a\alpha}^2 + v_{b\alpha}^2} \right) \\ i_{\beta}^* = \frac{2}{3} \left(\frac{v_{a\beta} \cdot p_{\beta} - v_{b\beta} \cdot q_{\beta}}{v_{a\beta}^2 + v_{b\beta}^2} \right) \end{cases} \quad (37)$$

Ainda se tratando do CCMR (Figura 55), na Figura 57 tem-se a região delimitada chamada de *deadzone*. Essa região possui restrições estabelecidas, que foram definidas com base na Tabela 6, que trata, especificamente, dos limites de frequência descritos no PRODIST na operação normal em regime permanente cujo valor é $\varepsilon = 0.1$.

Figura 57 – Região *deadzone* da frequência no CCMR.

Fonte: Próprio autor.

Portanto, o valor de referência adotado nas restrições – regidas pela Equação 38 – serão analisados para obter o desempenho desejado atendendo aos pré-requisitos normativos (Tabela 6), e os resultados obtidos serão apresentados no capítulo 6 de forma detalhada.

$$e(t) = \begin{cases} 0, & |e(t)| \leq \varepsilon \\ e(t), & |e(t)| > \varepsilon \end{cases} \quad (38)$$

O sistema de distribuição da MR e as instalações de geração conectadas a ela, em condições normais de operação e em regime permanente, operaram dentro dos limites de frequência entre $59,9Hz$ e $60,1Hz$. Quando há ocorrência de distúrbios na rede de distribuição na MR, as instalações de geração devem garantir que a frequência retomem aos valores de referência na faixa entre $59,5Hz$ a $60,5Hz$ no intervalo de tempo de 30 segundos. Tal condição visa garantir a recuperação do equilíbrio carga-geração.

Vale lembrar que a Tabela 7 traz as seguintes informações: na ocorrência de distúrbios no sistema de distribuição da MR, havendo necessidade de corte de geração ou de carga para permitir a recuperação do equilíbrio carga-geração, a frequência: a) não pode exceder $66Hz$ ou ser inferior a $56,5Hz$ em condições extremas; b) pode permanecer acima de $62Hz$ por no máximo 30 segundos e acima de $63,5Hz$ por no máximo 10 segundos; c) pode permanecer abaixo de $58,5Hz$ por no máximo 10 segundos e abaixo de $57,5Hz$ por no máximo 05 segundos. Todos os limites de frequência estabelecidos nesse tópico são baseados nos limites do PRODIST.

Embora as normas internacionais sejam utilizadas como fonte de embasamento teórico e de diretrizes brasileiras, exceto quando houver lacuna normativa, os limites devem respeitar os estabelecidos no PRODIST e as normas brasileiras vigentes.

A seguir serão apresentados os controles primário e secundário propostos utilizados no controle de frequência da MR.

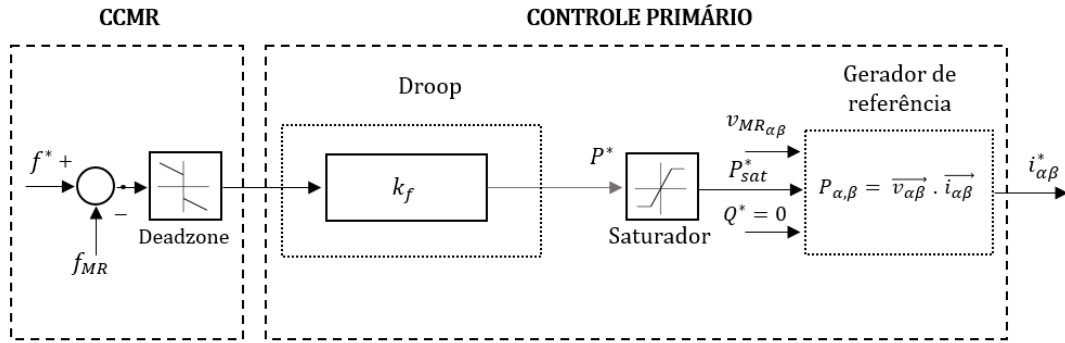
5.2 Controle Droop

Como abordado ao longo deste trabalho, as estratégias de controle primário são inspiradas no controle *droop* convencional, também nomeado estatismo, que são utilizadas em geradores síncronos de grandes sistemas de potência para definir tensão e frequência. O controle primário, aplicado as GDs despacháveis opera controlando a frequência e tensão; caso a demanda ou a geração sofra alguma alteração, as GDs despacháveis alteram para compensar o desvio do balanço de potência e os controladores *droop* de cada GD, receberão o desvio de geração e, conseqüentemente, alterarão as referências de frequência e tensão das respectivas fontes (CHANDORKAR; DIVAN; ADAPA, 1993; LASSETER, 2001; LASSETER et al., 2002).

A Figura 58 apresenta o bloco de controle primário. Observa-se que o controle *droop* nesta situação regula a potência ativa de acordo com o desvio frequência, conforme a Figura 12.

A estratégia utilizada teve como base os estudos desenvolvidos em (ROCABERT et al., 2012; GOMEZ et al., 2020; SENJYU et al., 2009). A potência de referência estabelecida pelo controle é limitada pelo saturador, o qual os valores de máximo e mínimo será a potência nominal de saída do inversor. Posteriormente, o bloco "gerador de referência" fornece ao controle interno a referência de corrente a ser seguida.

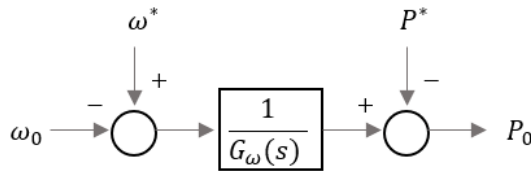
Figura 58 – Estrutura de controle droop do conversor do BESS.



Fonte: Próprio autor.

O diagrama interno do bloco do controle *droop* pode ser visto na Figura 59. Este bloco possui uma função de transferência $G_\omega(s) = m$, onde admite-se $k_f = 1/m$.

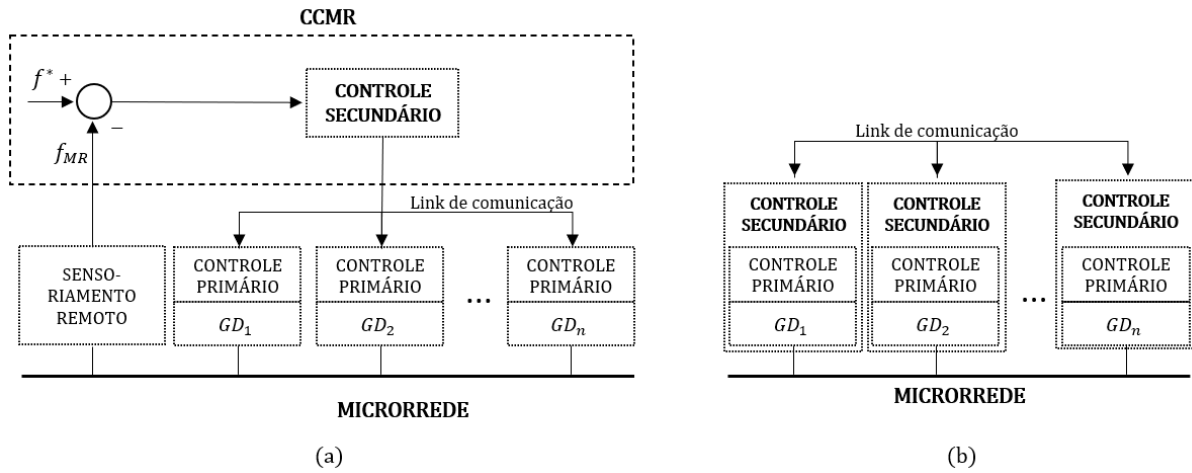
Figura 59 – Diagrama de blocos controle primário - *Droop*.



Fonte: Próprio autor.

Ao considerar o método *droop*, o mais difundido para compartilhar potência ativa e reativa em microrredes, uma desvantagem do método pode ser levada em consideração. Em regime permanente a frequência da MR desvia do valor nominal e para restaurar usa-se, geralmente, um sistema de controle secundário (SCS). O sinal obtido na saída do SCS é transmitido usando um canal de comunicação para às fontes de geração na MR, corrigindo a frequência. No entanto, os canais de comunicação são propensos aos atrasos no tempo e devem ser considerados no projeto do SCS; caso contrário, a operação da MR pode ser comprometida.

Figura 60 – (a) Controle secundário centralizado e (b) Controle secundário distribuído.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 60 (a) mostra a arquitetura de controle secundário que consiste n unidades GD controladas localmente por um controle primário e um controle secundário, que mede a partir do sensoriamento remoto e possibilita receber e enviar os parâmetros aos controladores. Assim, essas variáveis são comparadas com as referências a fim compensar pelo controle secundário, que envia o sinal de saída através do canal de comunicação para controle primário de cada unidade GD. A vantagem desta arquitetura é que o sistema de comunicação é capaz de trafegar um grande volume de dados, pois apenas mensagens unidirecionais (sensoriamento remoto para o CCMR e do CCMR para cada unidade GD).

Em (MOHAMED; RADWAN, 2011), foi implementado um conceito semelhante no CCMR para restaurar a frequência de MG controlado por *droop* de $P - f$. O compensador de restauração de frequência pode ser derivado da seguinte Equação:

$$\delta f = k_{Pf}(f_{MR}^* - f_{MR}) + k_{if} \int (f_{MR}^* - f_{MR}) dt \quad (39)$$

A desvantagem da centralização é que o CCMR não possui alta confiabilidade, pois uma falha deste controlador é capaz de parar a ação de controle secundário. Uma alternativa é apresentada na Figura 60 (b), que para contornar um único controlador centralizado são implementados controladores distribuídos. No entanto, mesmo utilizando o controle distribuído, há necessidade de um CCMR para coordenação de unidades durante o processo de *black start*, dentre outras funcionalidades de gestão do MG. A ideia inicial é implementar controladores primários e secundários juntos como um controlador local, assim controles primários e secundários são implementados em cada unidade de GD.

A proposta em (CHANDORKAR; DIVAN; ADAPA, 1993) surge da ideia trazida dos grandes sistemas elétricos de potência para compensar o desvio de frequência produzido pelo

controle local *droop* ($P - \omega$). A estratégia proposta de controle secundário, tem-se que cada GD mede a frequência(nos respectivos tempo de amostragem), calcula a média da frequência medida por outras GDs e, em seguida, restaura a frequência internamente respeitando a Equação 40.

$$\delta f_{GD_k} = k_{Pf}(f_{MR}^* - \bar{f}_{GD_k}) + k_{if} \int (f_{MR}^* - \bar{f}_{GD_k}) dt \quad (40)$$

$$\bar{f}_{GD_k} = \frac{\sum_{i=1}^N f_{GD_i}}{N} \quad (41)$$

Neste caso, o controle secundário em cada GD coleta todas as medições (frequência, amplitude de tensão e potência reativa) de outras unidades GD usando o sistema de comunicação, produzindo um sinal de controle apropriado para o nível primário e com isso possibilita eliminar os erros de regime permanente.

5.3 Estratégias de Controle Secundário

Na topologia apresentada na Figura 60 (a) é possível considerar na utilização dos trabalhos de (GUERRERO et al., 2010; BIDRAM; DAVOUDI, 2012; GUERRERO et al., 2013), que propõem no CCMR implementar um controlador PI no qual a frequência e a tensão de realimentação são medidas no PAC. Os controladores PI para frequência e tensão são expressos pelas Equações:

$$\Delta\omega_{secPI} = (K_{pw} + \frac{K_{iw}}{s})(\omega_0 - \omega_{PAC}) \quad (42)$$

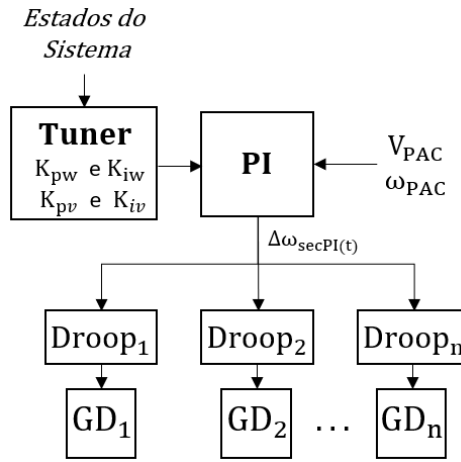
$$\Delta V_{secPI} = (K_{pv} + \frac{K_{iv}}{s})(V_0 - V_{PAC}) \quad (43)$$

onde $\Delta\omega_{secPI}$ e ΔV_{secPI} são as referências de frequência e tensão da entrada do controle primário de cada GD, através do canal de comunicação; ω_{PAC} e V_{PAC} são a frequência e a tensão monitoradas no PAC; ω_0 e V_0 são os valores de referência para tensão e frequência; K_{pw} e K_{pv} são os ganhos proporcionais dos controladores PI para frequência e tensão; K_{iw} e K_{iv} são os ganhos integrativos dos controladores PI para frequência e tensão.

Outras alternativas para o controle secundário - como Fuzzy e Redes Neurais - ajudam a melhorar o desempenho do controlador PI realizando a atualização dos ganhos, no momento que ocorrer as mudanças do ponto de operação do sistema ou até mesmo da topologia o controle (BEVRANI et al., 2012; AHMADI; SHOKOOHI; BEVRANI, 2015; SHOKOOHI et al., 2018). Essas estratégias podem ser ilustradas através da Figura 61, onde CCMR opera o controle

secundário através de um controlador PI. A malha de controle *Tuner* atualiza os ganhos do controlador PI de acordo com informações de entrada do sistema, tais como: tensão, frequência, potência ativa e reativa gerada ou demandada.

Figura 61 – Controle secundário centralizado com ganhos do controle PI variáveis.



Fonte: Próprio autor.

Nos trabalhos de (GODOY et al., 2019; LIU; WANG; LIU, 2014) são apresentados os métodos de ajustes do ganho do controlador PI considerando as características dinâmicas das GDs presentes na MR, além dos respectivos atrasos na comunicação. Na condição na qual o controlador apresente um ganho e/ou tempo de resposta elevado, a própria dinâmica das GDs ou do atraso na comunicação não serão capazes de rastrear as ações de controle, tornando o sistema instável.

Conforme discutido anteriormente, as estratégias controle descentralizados definem ações de controle localmente, como mostrado na Figura 60 (b), e não possuem canal de comunicação central. O trabalho de (XIN et al., 2014) traz uma estratégia de controle de frequência utilizando um controlador proporcional em série com um filtro passa baixa. O filtro é responsável em adicionar um atraso ao controle secundário, e filtrar componentes de alta frequência que poderiam ocasionar instabilidade do sistema. A estratégia não atinge erro nulo devido ao controle proporcional. Porém, há possibilidade de manter o erro de regime permanente dentro dos limites de qualidade de energia exigidos. A referência de frequência gerada é descrita pela seguinte equação:

$$\Delta\omega_{secPFB_i} = \frac{K_{pPFB}(\omega_0 - \omega_i)}{1 + s t_{fp_i}} \quad (44)$$

onde $\Delta\omega_{secPFB_i}$ é a referência de frequência gerada do controle secundário, K_{pPFB} é o ganho proporcional, t_{fp_i} é o tempo de resposta do filtro passa baixa, ω_1 é a frequência local, ω_0 é a frequência de referência para o controle secundário e i é o índice da GD associada.

Estudos a respeito de algumas estratégias de controle centralizados são apresentados de forma sucinta a seguir. Em (WEITENBERG et al., 2018) propõe uma estratégia de controle para frequência através de *Leaky* integral, a qual não garante erro nulo. Já em (WANG et al., 2014; LOU et al., 2017b; GU et al., 2017) as variáveis locais, de frequência, tensão e corrente, são medidas e enviadas a um estimador de estados. Com essas variáveis e com o modelo dinâmico da MR, o estimador consegue estabelecer as medidas de frequência, tensão, potência ativa e reativa para as demais GDs e/ou cargas da MR. Essas estratégias podem apresentar ações de controle coordenadas, porém a precisão da ação de controle é diretamente relacionada com as variáveis estimadas das outras GDs.

Uma estratégia diferente das apresentadas até então para o controle da tensão e frequência, usando filtro *Washout*, foi proposta em (HAN et al., 2017a). O filtro substitui o controle primário convencional que desempenha simultaneamente o papel de controle primário e secundário. A estratégia, diferentemente das anteriores, apresenta como principal vantagem erro nulo em regime permanente. A seguir são expostas as Equações 45 e 46 que descrevem esta estratégia, em que K_{sp} e K_{sv} são os ganhos integrativos do controle.

$$s \omega_i = K_{sp}(\omega^* - \omega_i) - m s(P - P^*) \quad (45)$$

$$s V_i = K_{sv}(V^* - V_i) - n s(Q - Q^*) \quad (46)$$

Ao longo do capítulo, foram abordadas diversas vantagens, se tratando de confiabilidade, do controle secundário descentralizado em relação ao centralizado, aplicações como as ações de controle coordenadas para diferentes cenários e sincronização com a rede principal, ainda não são possíveis devido à falta de comunicação. Mesmo diante da possibilidade de perda de comunicação nenhuma, estratégia discute ou propusera solução. Portanto, ao escolher a estratégia de controle da MR deve ser ponderado as características operativas necessárias para a MR. Se caso ela necessite de um controle centralizado de alta confiabilidade, os investimentos terão que levar em consideração a redundância do controle e do sistema de comunicação, garantindo assim a retaguarda.

Outro ponto relevante, se tratando do tema, são as estratégias de alívio de carga no controle primário. Embora uma atuação errada ou falha do controle secundário pode acarretar a instabilidade da frequência, causando o corte da carga. Como o alívio de carga em MRs, no controle primário, tem a função de manter a estabilidade quando a carga é superior a capacidade de geração, ou situações de grande perturbação de forma a ocorrer grande distúrbios na frequência ou na tensão a atuação é desejada e pode ser realizada de forma centralizada, descentralizada e distribuída, sendo classificadas como: tradicional, semi-adaptativa e adaptativa (LOPES; MOREIRA; MADUREIRA, 2006; LAGHARI et al., 2013; BAKAR et al., 2017). Como o fruto

dessa tese não a trazer ao leitor as estratégias de alívio de carga, ela foi citada de forma breve a título de explorações futuras da área, ainda pouco explorada e de grande aplicabilidade nas MRs.

A tese propõe um novo método de controle que desempenhará um papel de controle primário e secundário baseado no aprendizado emocional do cérebro (BELBIC). O desempenho do método de controle proposto será mostrado no Capítulo 6, posteriormente comparado com os obtidos utilizando o *droop* – como controle primário – e um PI convencional adaptado para operar como controle primário e secundário.

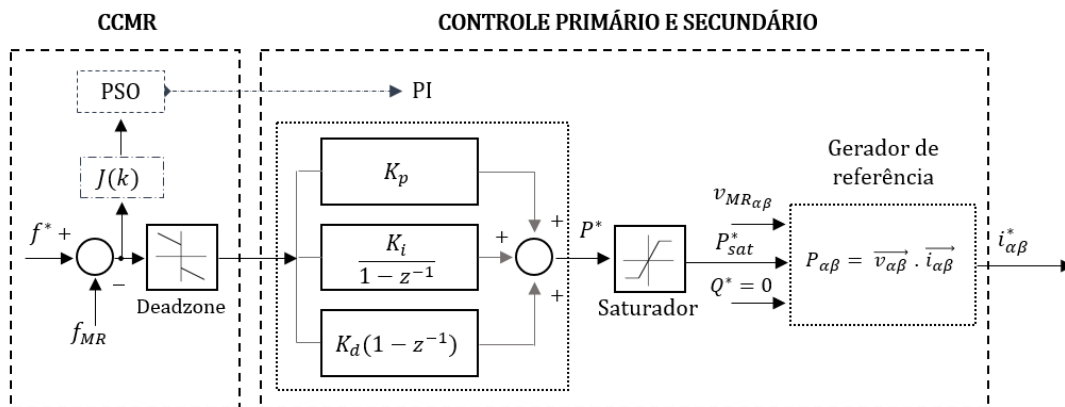
5.4 Controle PI para restauração da frequência da MR

Como nos trabalhos citados na Seção 5.3, as alternativas apresentadas propuseram como controle secundário o PI convencional e/ou PI adaptativo – que é capaz de atualizar os ganhos do controlador utilizando Fuzzy e Redes Neurais. Também no trabalho de (HAN et al., 2017a), o filtro de *Washout* é evidenciado como uma estratégia um pouco diferente das anteriores substituindo o controle primário convencional e modela um controle que desempenha simultaneamente o papel de controle primário e secundário.

Um controlador Proporcional-Integral (PI) é apresentado como um controlador primário e secundário, responsável em definir a potência do BESS injetada ou absorvida no sistema no controle de frequência da microrrede, e posteriormente os parâmetros do controlador ajustado utilizando a técnica do PSO considerando a função objetivo (Equação 36), cujo os resultados serão apresentados no capítulo seguinte.

A Figura 62 mostra a estrutura do controle primário e secundário proposto como alternativa para confrontar posteriormente com os resultados obtidos utilizando o BELBIC. O controle PI projetado parte do princípio da estrutura genérica da Figura 55.

Figura 62 – Estrutura de controle PI do conversor do BESS.



Fonte: Próprio autor.

O ajuste dos controladores PID convencionais é uma tarefa complexa – quando o processo

está sujeito a fatores externos desconhecidos – que exige conhecimento do sistema, além da necessidade de aplicar e conhecer diversos métodos convencionais para ajustes adequados dos parâmetros, mas não fornecem um ajuste ideal. A tese propôs, para esse sistema (controle de microrrede), que os ganhos PI seriam otimizados através do PSO com minimização do Erro Absoluto Integral (do inglês *Integral Absolute Error* – IAE) e com isso possibilitem encontrar ganhos ótimos. Alguns estudos aplicam o mesmo método para ajuste desse controlador (GIRIRAJKUMAR; JAYARAJ; KISHAN, 2010; MERCY; GIRIRAJKUMAR, 2017; EL-GARHY; MUBARAK; EL-BABLY, 2017).

5.5 Controle BELBIC para restauração da frequência da MR

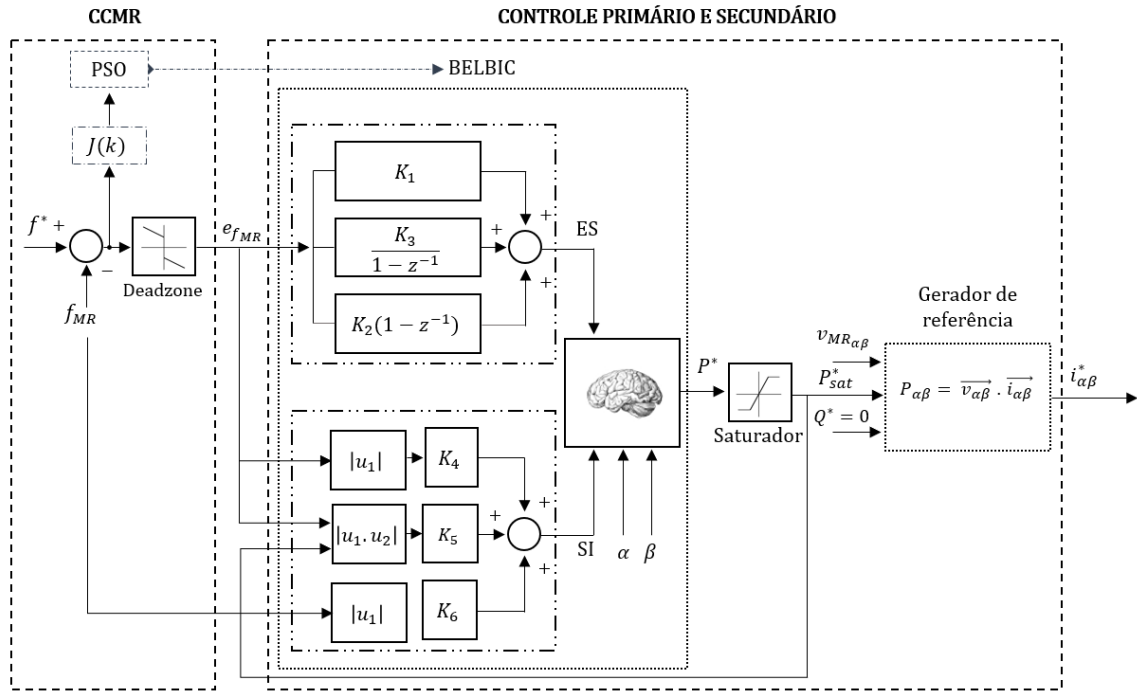
Os sistemas ditos inteligentes consideram a capacidade de aprender e adaptar os parâmetros para melhorar o desempenho do sistema e adequar as condições encontradas com as variações do meio que são submetidos (SHAHMIRZADI, 2005). Diante desse contexto, o trabalho de (NALLADURAI; BANU, 2015), apresenta o desenvolvimento de um controlador com base no método de processamento emocional no cérebro, que surge como alternativa para os problemas de variação de frequência devido a incerteza nas cargas em dois sistemas de energia interligados. O erro em regime permanente pode ser eliminado ao utilizar o controle PI, porém gerou um *overshoot* no sistema. Assim, os resultados do BELBIC, para as condições impostas neste artigo, obteve melhor desempenho e robustez.

No estudo citado, o controlador BELBIC foi aplicado para melhorar o desempenho do controle e demonstrou melhores resultados quando comparados aos controladores lineares convencionais.

Analogamente ao controle apresentado na Seção 5.4 (Proposta PI), é proposto um controlador BELBIC que será implementado no controle de frequência das microrredes, e com grande potência adaptativo e flexibilidade na aplicação das mais diversas topologias de MR. Da mesma forma já citada, o BELBIC terá um papel de controle primário e secundário, partindo do mesmo princípio da proposta de (HAN et al., 2017a). Com essa estratégia espera-se, como no caso anterior, a vantagem de obter nas simulações(cenários) erro nulo em regime permanente.

A Figura 63 mostra a configuração do controlador BELBIC, proposta para controle da potência do BESS aplicado no cenário de controle de frequência em MR. O método irá possibilitar definir a potência injetada ou absorvida através do conversor e sistema de armazenamento de energia em baterias, garantindo assim a estabilidade da MR nas mais diversas condições de operação, que serão definidas nos respectivos cenários discutidos no capítulo de resultados.

Figura 63 – Estrutura de controle BELBIC do conversor do BESS.



Fonte: Próprio autor.

Da mesma forma do controlador PI proposto, os parâmetros do controlador BELBIC serão ajustados utilizando a técnica de otimização PSO, respeitando as condições definidas na função objetivo apresentada na Equação 36. A técnica PSO para ajuste dos parâmetros do controlador BELBIC também foram utilizadas nos trabalhos de (DORRAH; EL-GARHY; EL-SHIMY, 2011; EL-GARHY; MUBARAK; EL-BABLY, 2017), em sistemas distintos de uma microrrede. A própria técnica proposta de otimização, aplicada no ajuste do BELBIC, foi implementada pelo próprio autor da tese em (MARQUES et al., 2022).

5.6 Implementação da microrrede em Simulink

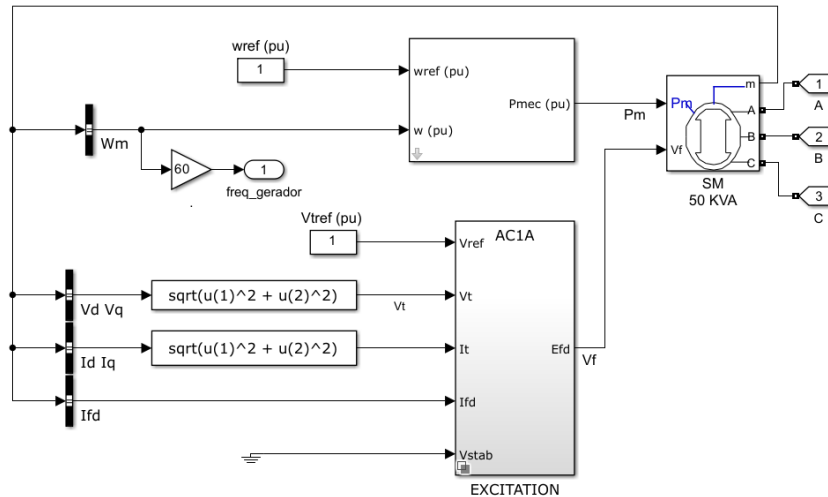
Para implementação da Microrrede no MATLAB®, foi utilizado um computador com processador Intel®Core™i7- 7700HQ CPU 2.80GHz, 32 GB de memória RAM.

Alguns dos blocos disponibilizados pelo *Simulink* são diretamente implementados, sendo os respectivos parâmetros ajustados em função do caso estudado. A modelagem do comportamento dinâmico de determinados elementos do sistema serão apresentados de forma sucinta para facilitar o entendimento. Elementos como transformadores, cargas e blocos de medição não são referidos, pois são de implementação e uso simples e/ou arbitrário, não necessitando de uma análise aprofundada. A seguir serão apresentados os blocos de relevância para o método desenvolvimento neste trabalho.

O primeiro bloco apresentando é o modelo dinâmico da máquina síncrona, observado na

Figura 64. O modelo utilizado encontra-se disponível na biblioteca *Matlab®/Simulink®*, sob a forma de um bloco de parâmetros configuráveis com a designação de "*Synchronous Machine pu Standard*". O bloco pode operar como gerador ou motor, sendo o modo de operação definido pelo sinal da potência mecânica aplicado no terminal " P_m ". Ao terminal " V_f ", é aplicado um sinal de tensão proveniente da excitação da máquina.

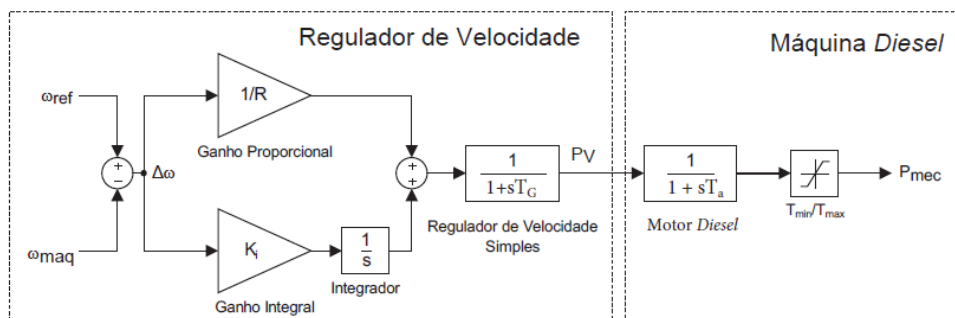
Figura 64 – Modelo simplificado representativo da máquina síncrona e respetivos reguladores de velocidade e de tensão.



Fonte: Adaptado MatLab®/Simulink®.

Ainda com base na Figura 64, é apresentando na Figura 65 que traz o modelo dinâmico que inclui o conjunto regulador de velocidade e máquina primária implementado em ambiente Matlab® /Simulink®(KUNDUR; BALU; LAUBY, 1994). A máquina diesel é modelada de forma simplista, considerando apenas o comportamento do atraso temporal T_a , não considerando as perdas mecânicas e outros aspetos dinâmicos relacionados ao comportamento mecânico.

Figura 65 – Modelo dinâmico simplificado representativo do regulador de velocidade e máquina primária de um grupo térmico diesel.



Fonte: Adaptado MatLab®/Simulink®.

O regulador de velocidade de um grupo gerador implementa dois tipos de ações de controle de potência/frequência: regulação primária de frequência (controle proporcional - regido

pelas característica de estatismo potência ativa/frequência) e a regulação secundária de frequência (controle integral). A regulação primária visa o restabelecimento do desvio causado pela variação da produção e consumo no SEE após ocorrência de uma determinada perturbação. Com isso, o sistema estabilizará no novo valor de frequência, diferente da referência. No SEE com diversos geradores, a variação de potência por cada um, baseia-se no compartilhamento em função do respectivo valor de estatismo R . Entretanto, a regulação primária não permite que o valor da frequência retorne a sua referência, e neste caso, o controle secundário age no intuito de eliminar o desvio de frequência, ou seja, restabelecer a velocidade de rotação das máquinas para sua referência, conseguindo variar a potência mecânica fornecida pela máquina primária.

No modelo da Figura 65, identificam-se:

- As variáveis:

- ω_{maq} é a velocidade de rotação atual da máquina síncrona (p.u.rad/s).
- $\Delta\omega$ é o desvio da velocidade de rotação da máquina síncrona, em relação ao respectivo valor de referência ω_{ref} (p.u.rad/s).
- P_V é a posição de abertura das válvulas/porta de admissão de combustível.
- P_{mec} é a potência mecânica fornecida pela máquina primária (diesel) à máquina síncrona (p.u.MW).

- Os parâmetros:

- ω_{ref} é a velocidade de rotação de referência da máquina síncrona (p.u.rad/s).
- R é o estatismo (p.u.Hz/pu.MW), parâmetro associado ao controle proporcional (primário) do grupo térmico.
- K_i é a constante de ganho integral (p.u.MW/p.u.Hz), associada ao controle integral (secundário) do grupo térmico.
- T_G é a constante de tempo do regulador de velocidade (s).
- T_a é a constante de tempo do motor diesel (s).

Ao estudar estabilidade transitória, a modelagem do gerador e o sistema de excitação é um ponto importante para avaliar os requisitos de desempenho do sistema e essencial na coordenação do sistema de proteção e controle auxiliar. Toda a modelagem pretendida depende da finalidade do estudo que se deseja realizar. Com base nisso, o IEEE disponibiliza vários modelos destes sistemas, controles suplementares e limitadores. Porém, como o foco da tese não parte do princípio de avaliar o melhor modelo que se aplica ao sistema em questão, foi decidido

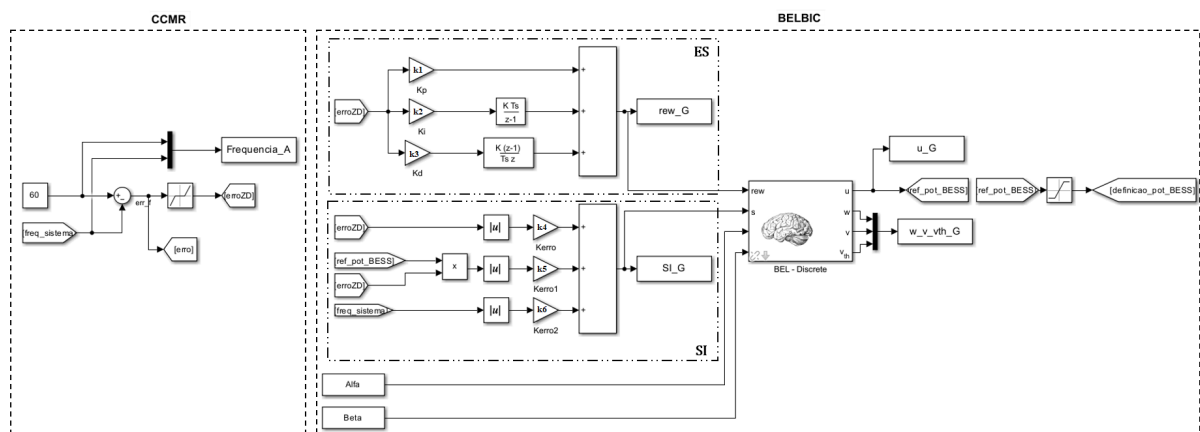
limitadores de sub-excitação (V_{UEL}) e sobre-excitação (V_{OEL}), caso estes estejam representados, e também dos limites $V_{R_{\max}}$ e $V_{R_{\min}}$. Após o V_R é subtraído do sinal V_{FE} , que representa a soma do sinal da função de saturação da excitatriz $S_E[V_E]$, com o sinal proveniente do fator de desmagnetização (K_D).

Conforme o enrolamento de campo da máquina principal corresponde a uma carga predominantemente indutiva para a excitatriz AC, esta provoca uma reação de armadura gerando um fluxo no sentido oposto ao criado pelo regulador de tensão. A reação de armadura, conforme a carga ligada à máquina principal, pode acarretar alterações no modo de comutação dos díodos da excitatriz rotativa (FERGUSON; HERBST; MILLER, 1959; GAYEK, 1964). A queda de tensão da saída da excitatriz devido à regulação do retificador é simulada ao considerar a constante K_C (que é uma função da reatância de comutação) e a curva de regulação do retificador (F_{EX}), conforme descrito na IEEE Std 421.5TM – 2005 (DEVELOPMENT; COMMITTEE, 2005) no Anexo D desta normativa, a qual corresponde à função de regulação do retificador.

Outros dois blocos utilizados na implementação já foram descritos anteriormente para facilitar o entendimento da modelagem no *Simulink*, desta forma o bloco da bateria mostrado detalhadamente na seção 3.3.1.2 e o fotovoltaico 3.3.2, respectivamente.

Por fim, o controlador BELBIC proposto, será discutido detalhadamente a cerca da sua implementação no *Simulink* e apresentado na Figura 67. O equacionamento que rege o modelo, foi apresentando ao longo do capítulo 4 – relacionado ao controlador. Inicialmente criou-se as restrições para o CCMR, onde tem-se o cálculo do desvio de frequência e posteriormente passa pela restrição estabelecida na *deadzone* (Equação 38).

Figura 67 – Diagrama de BELBIC no simulink.



Fonte: Próprio autor.

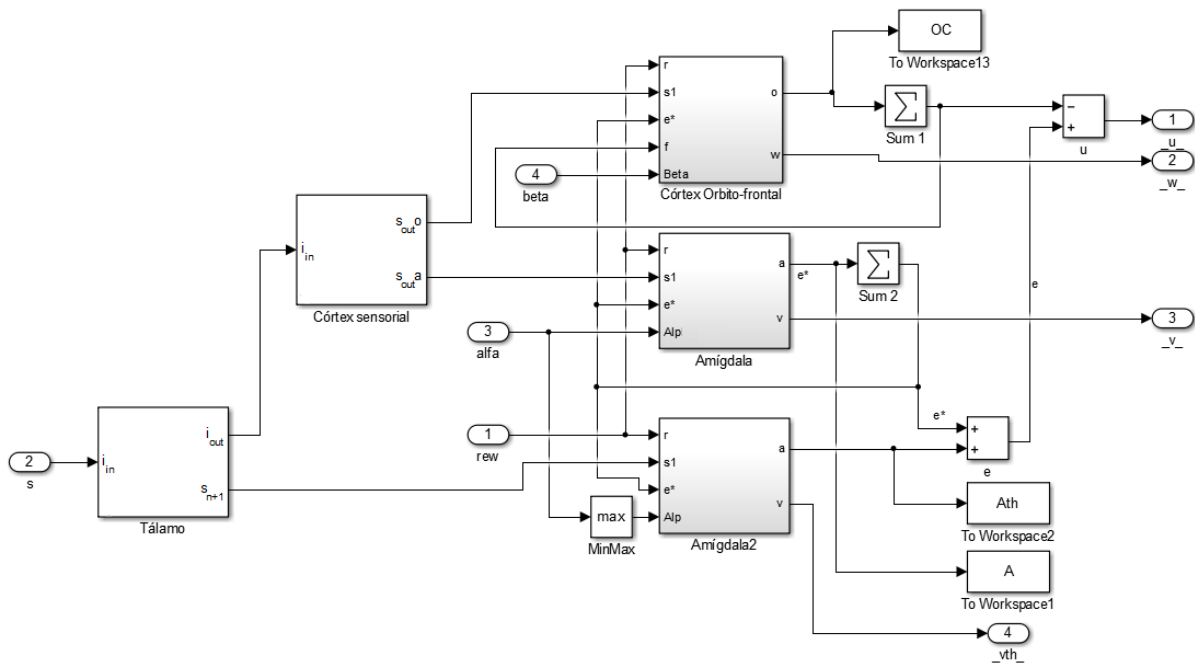
Como visto ao longo do capítulo 4, a referência do sinal emocional é dada pela Equação 30. De acordo com a Figura 67, observa-se que o k_1 , k_2 e k_3 são os parâmetros que são associados ao sinal de entrada ($e_{deadzone}$). Como pode ser visto, o somatório dos produtos ($k_1 \cdot e_{deadzone}$),

$(k_2 \cdot \frac{d}{dt} e_{deadozone})$ e $(k_3 \cdot \int e_{deadozone} dt)$ resultam no sinal emocional ES .

Outro sinal, desse controlador, apresentado na Equação 31 é o sinal de estímulo sensorial (SI_i). Analogamente ao sinal anterior, os parâmetros k_4 , k_5 e k_6 são multiplicados pelos sinais " $e_{deadozone}$ ", módulo de " $(P_{sat}^* \cdot e_{deadozone})$ " e módulo de f_{MR} , respectivamente. Podem também ser observado duas constantes (α) e (β) que também compõem as equações do controlador. Os outros sinais gerados através do bloco BELBIC são: o sinal de controle " u ", o peso do córtex orbitofrontal " w ", o peso da amígdala " v " e o sinal máximo " v_{th} ", que serão analisados posteriormente.

Além dos sinais citados acima, o controlador internamente possui outras conexões entre os blocos das respectivas estruturas do sistema límbico, representadas na Figura 68.

Figura 68 – Diagrama de blocos do controlador BELBIC.



Fonte: Próprio autor.

Os sinais dos estímulos sensoriais (SI_i) é entrada do bloco do tálamo através da entrada " i_{in} "; o bloco gera duas saídas " s_{out} ". O sinal " i_{out} " é enviado para a entrada " i_{in} " do córtex sensorial, cujas saídas são enviadas para o córtex orbitofrontal e amígdala. Já a outra saída do tálamo " s_{n+1} " envia para amígdala o sinal máximo. Em seguida, o bloco córtex orbitofrontal recebe através da entrada " r " o sinal emocional (ES), na entrada " s_1 " recebe o sinal do córtex sensorial " s_{out}^0 ", na entrada " e^* " recebe o sinal do somatório da resposta da amígdala " a ", na entrada " f " recebe o sinal do somatório da saída " o " do córtex orbitofrontal e na entrada ($beta$) recebe o valor da taxa de aprendizagem. Observa-se que nesse bloco, a saída " o " será o valor (OC_i) (Equação 21) e (w) é seu peso associado. Posteriormente será apresentado graficamente o seu sinal para análise do comportamento.

Observa-se que a representação da amígdala possui dois blocos, onde " r ", da mesma forma que o córtex orbitofrontal, recebe o sinal emocional (ES), a entrada " s_1 " tem como sinal o valor " $S_{out}a$ " proveniente do córtex sensorial, a entrada " e^* " analogamente ao córtex orbitofrontal recebe o mesmo sinal e sua entrada " Alp " tem como entrada a constante que é responsável pela velocidade de aprendizagem ($alfa$). Do mesmo modo, o outro bloco da amígdala, aqui representada como "amígdala2", tem as mesmas entradas, diferindo apenas o sinal " s_1 " cujo valor de entrada provém do tálamo, sendo este o valor máximo das entradas sensoriais (SI_i).

Por fim, o sinal de controle " u ", aqui chamado de (MO) (Equação 26), é a diferença do somatório das saídas dos dois blocos das amígdalas " a " e o somatório da saída do bloco do córtex orbitofrontal " o ". Para que se possa ter esses valores (sinais) dispostos para análises posteriores, eles serão armazenados em uma variável no *Workspace* do MATLAB®. Com isso, será possível comprovar o comportamento do sistema límbico, segundo toda teoria apresentada no capítulo 4.

Como mencionado, o método aplicado para ajuste dos parâmetros, o algoritmo PSO, foi desenvolvido em ambiente MATLAB®, cujo o *script* de extensão "*.m*" será apresentando um pseudocódigo do algoritmo. Assim, esse arquivo pode conter qualquer comando ou função definida pelo usuário. Na seção 4.2.2 foi apresentado o fluxograma do algoritmo PSO na Figura 51. Uma vez compreendidos os conceitos básicos do PSO, todos os passos estabelecidos serviram de base no desenvolvimento do código. Portanto, estudos comprovam que a utilização do PSO como alternativa para a solução de problemas de otimização se mostra bastante competitiva em relação a outros algoritmos evolutivos. Este algoritmo é de implementação computacional direta e possui custo computacional reduzido. Após implementado, a avaliação dos resultados experimentais serão apresentados no capítulo 6.

5.7 Conclusão do capítulo

Neste capítulo, na composição da MR, foi considerada a utilização de um sistema de armazenamento de energia capaz de participar na regulação da frequência da MR. Para tal sistema, será analisado no próximo Capítulo o comportamento dinâmico dos inversores que efetuam o seu interfaceamento com a MR. Para cada estratégia proposta no capítulo 5 foram definidos os principais parâmetros que influenciam a resposta do sistema de controle dos inversores, no âmbito da regulação primária e secundária de frequência. Os resultados obtidos para as principais grandezas serão apresentados e analisados a seguir, com intuito de comprovar o benefício da inserção dos sistemas de armazenamento na melhoria da estabilidade dinâmica de rede isoladas, aplicando-se o controlador proposto para esta tese (BELBIC).

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

No presente capítulo são descritos os dois cenários propostos e os respectivos pontos de operação que visam simular a MR operando em modo ilhado. Os resultados destas condições de ilhamento, variação de carga e geração fotovoltaica, podem provocar perturbações que geralmente comprometem a estabilidade de frequência da MR. Assim, para os cenários construídos o objetivo é avaliar a utilização de sistemas de armazenamento de energia em baterias para melhoria das condições de estabilidade.

No capítulo serão apresentados os cenários de simulação considerados para análise da estabilidade do comportamento dinâmico de uma pequena microrrede e as propostas para novos cenários que serão estudados. Este sistema foi construído no *Matlab/Simulink*. Serão conduzidas as simulações cujo objetivo é centrado na simulação de cenários operacionais de microrredes isoladas, com inserção de energia renovável e que, em casos de tempos de simulações maiores podem evidenciar a influência da variabilidade na operação do sistema.

No Cenário 1 será analisado, inicialmente, a definição da região de operação do BESS com base na *deadzone* no controle de frequência em diferentes pontos de operação. Em seguida foi discutido a implementação da técnica PSO e o controlador BELBIC num ambiente computacional, e diante da análise dos resultados à definição/escolha do controlador BELBIC que possua a melhor aderência à proposta, diante de várias possibilidades e que serão discutidas detalhadamente. Ao final das simulações, serão validados os resultados encontrados através das aplicações dos controladores (*droop*, PI e BELBIC) no controle da frequência da MR, que obtenha a melhor resposta antedendo todos os pré-requisitos impostos. De forma detalhada, será acrescentando ao capítulo os controles que atuam no BESS e FV, além das análises dos links CC e comportamento do VSC ao longo das simulações.

Já para o Cenário 2, a condição de variabilidade de energia fotovoltaica e uma diminuição de carga na MR. Na Seção 6.1.3, análises comparativas serão exploradas entre os dois cenários, mostrando ao leitor as características peculiares de cada controlador independente do cenário proposto, comprovando a robustez e flexibilidade de operação de cada um controlador e controle hierárquico.

Também no capítulo, serão discutidos a influência do gerador à Diesel na MR e sua importância como referência de frequência. Como na MR proposta encontra-se esse gerador, ele será responsável em estabelecer e manter a tensão e frequência do sistema, diante da sua capacidade de atuação rápida/controlável e ficando o BESS para suporte despachável para esse sistema. Na situação onde potência de saída dos recursos de geração da MR forem insuficientes para atender a demanda, o SAE deve iniciar a compensação de potência atuando como geração. Quando a potência de saída dos GDs não controláveis excederem a demanda da carga, a potência

excedente deve ser absorvida pelo sistema de armazenamento (atuação como carga). Caso o SAE atue como geração e ainda assim não for possível atender a demanda de potência com segurança, deve-se acionar os esquemas de alívio de carga (corte de carga).

Para isso, foram inseridos blocos da plataforma *Matlab/Simulink* com o objetivo de calcular o desvio de frequência em função de uma variação de carga ou variação da geração, cujo resultado servirá de entrada para os controladores que atuarão como controle primário e primário/secundário, no intuito de minimizar ou eliminar o desvio de frequência dentro da faixa estabelecida.

Neste trabalho será analisada a dinâmica da resposta de frequência, utilizada como referência de avaliação, porém sem que haja efetivamente conexão com a rede, mantendo-se no modo ilhado ao longo das simulações.

6.1 Cenários e pontos de operação

Os cenários estudados nessa tese consideram o mesmo ponto de operação inicial, descrito na Tabela 20. Este ponto de operação é aplicado para os dois cenários:

- Cenário 1: modo ilhado com variação de carga;
- Cenário 2: modo ilhado com variação de carga e geração fotovoltaica.

As simulações em todos os cenários buscam apresentar uma situação em que a MR inicie em uma condição ilhada e com as cargas 1, 2 e 4 sempre conectadas as respectivas barras. A depender do cenário, a carga 3 será conectada ou desconectada da barra, conforme apresentando na Figura 52. Inicialmente a MR está operando com o controle primário *droop* e posteriormente com os controles PI e BELBIC como controle primário e secundário. Na sequência, os seguintes eventos são aplicados:

- Cenário 1
 - Em $t = 8$ segundos de simulação, a demanda elétrica associada à carga é incrementada em 20 kW e 5 kvar;
 - Em $t = 15$ segundos de simulação, a carga 3 é desconectada da barra.
- Cenário 2
 - Em $t = 8$ segundos de simulação, a potência da geração fotovoltaica varia de 28kW para 42 kW. A carga 3 não está conectada a barra;
 - Em $t = 15$ segundos de simulação, a geração fotovoltaica passa de 42kW para 22kW. A carga 3 não está conectada a barra.

As diferenças entre cada um dos cenários estudados estão presentes nos eventos que ocorrem nos controladores, os quais são detalhados nas seções seguintes. Para todos os cenários é considerado que a ação do controle primário e/ou secundário é suficiente para manter frequência dentro dos patamares desejados. A avaliação dos benefícios na inserção dos sistemas de armazenamento de energia para melhoria das condições de estabilidade nas MRs isoladas, atribui-se à estabilidade de frequência e ao conjunto de ações de controle que visam garantir tal estabilidade após a ocorrência de perturbações que provoquem desequilíbrios de carga/geração, e o conjunto de ações de controle associadas ao conceito de regulação ou controle primário e secundário.

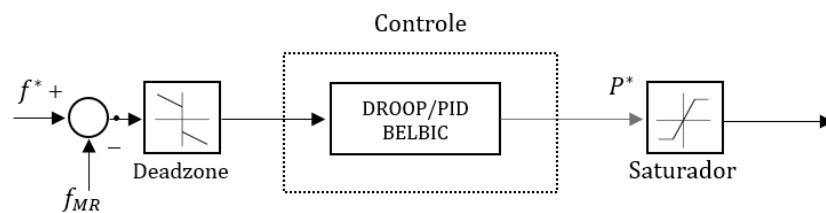
6.1.1 Cenário 1 - Operação ilhada ocorrendo variação de carga

6.1.1.1 Análise da deadzone aplicada ao controle droop

As condições de operação e limites de frequência adotados pelo PRODIST, apresentadas na Tabela 6, foram tomados como referências nas análises dos resultados visando a influência dos parâmetros acima referidos no comportamento dinâmico da MR, bem como das capacidades dos controles propostos.

A Figura 69 mostra o diagrama de controle usado na análise comparativa entre as técnicas apresentadas e serão discutidas ao longo do capítulo. Implementado os três controles com a inclusão de uma *deadzone* no sinal de entrada - geralmente a frequência ou fluxo de potência ativa em uma linha de transmissão(a exemplo) - e um limitador de potência de referência no sinal de saída que evita a saturação do sistema de armazenamento.

Figura 69 – Esquema de controle dos controladores, que inclui *deadzone* no sinal de entrada e um limitador de potência de referência.



Fonte: Próprio autor.

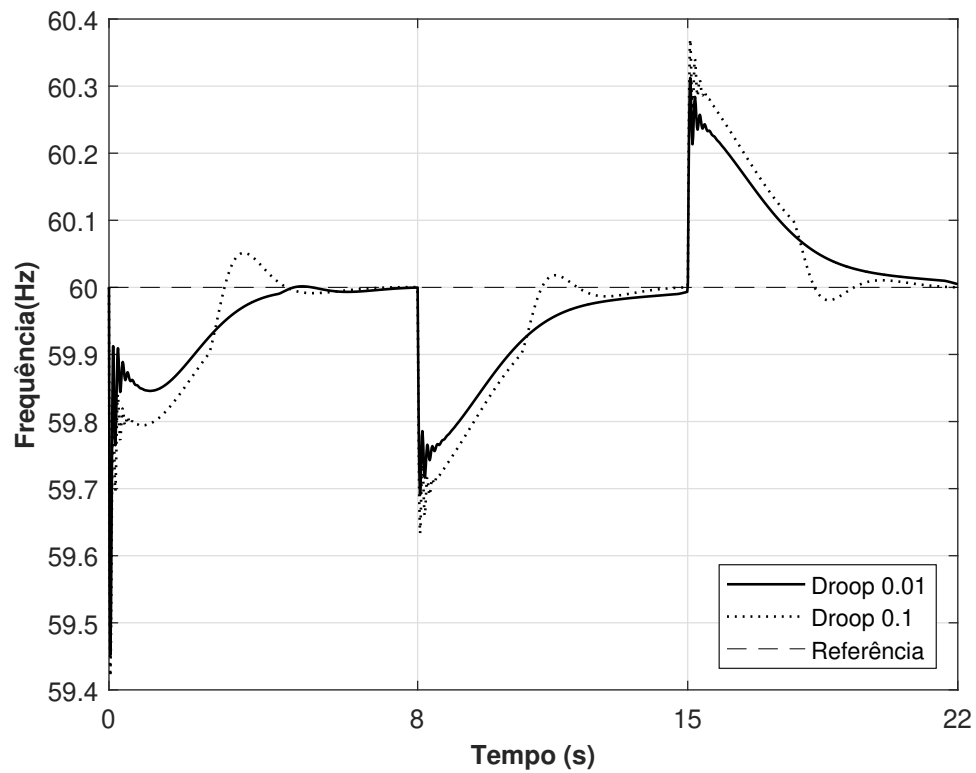
A facilidade da implementação e a estrutura dos controladores PI e *droop*, bem como a ampla utilização, são os dois principais pontos fortes dos controladores (já discutidos nas Seções 5.2 e 5.4). Lembrando que os parâmetros do controlador PI foram ajustados utilizando a técnica do PSO, considerando a função objetivo (Equação 36), cujos valores encontrados são $K_p = 9344,4$ e $K_i = 723,92$. No caso onde é aplicado a estrutura do controle PI, percebe-se uma não dependência da tecnologia do SAE. No entanto, incertezas do sistema e as mudanças nas topologias podem causar o comportamento inesperados do controlador, e assim todo o

sistema (ETXEBERRIA et al., 2011). Portanto, justifica-se a necessidade de considerar outros controladores adaptativos e robustos, como os descritos na Seção 5.5.

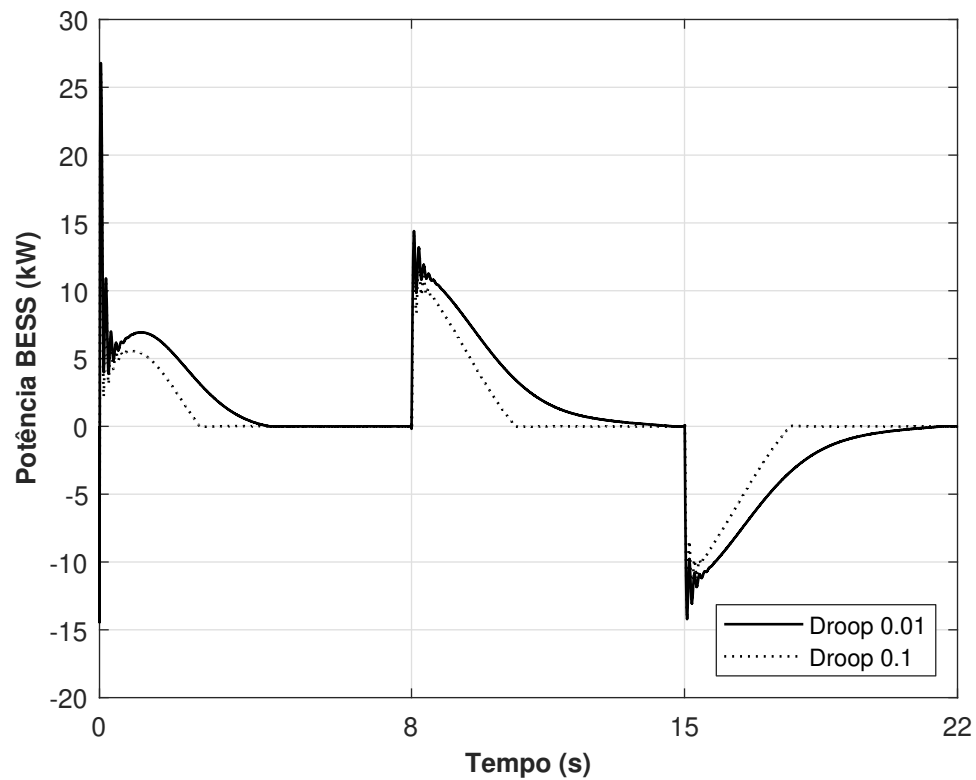
Ao considerar a Figura 57, tem-se a região delimitada (*deadzone*), essa região possui restrições estabelecidas com base na Tabela 6, que trata, especificamente, dos limites de frequência descritos pela PRODIST na operação normal em regime permanente cujo valor é $\varepsilon = 0.1$. A região pode ser classificada, geralmente, em dois principais tipos a serem implementadas. No modelo descontínuo de *deadzone* - ou escalonada - é permitido um melhor desempenho do controle, pois a saída do controlador rastreia o sinal de entrada(real). Por outro lado, o contínuo suaviza a resposta do sistema de armazenamento ao sair da região de zona morta. Esta é mais utilizada para sistemas de armazenamento de energia. Ao definir a configuração que inclui blocos de zona morta e LPF (do inglês, *Lowpass Filter*), que são responsáveis em reduzir a sensibilidade do controle do BESS em pequenas perturbações de alta frequência, como ruídos; tem como objetivo reduzir o número de operações de carga/descarga, e com isso o aumento da vida útil do sistema de armazenamento de energia (MILANO; MINANO, 2013).

Após o entendimento do motivo e causa da definição desta região, é possível analisar, ainda na Figura 69, o sinal de entrada do controle (erro). O sinal erro é calculado através da diferença entre o valor de referência(f^*) e valor medido(f_{MR}), ou seja, ($erro = f^* - f_{MR}$). Caso o valor encontrado esteja dentro da região delimitada, o BESS não injeta e nem absorve(inativo) e sua energia armazenada, portando, é mantida constante. Para valores fora da região, o BESS injeta potência ativa no PAC através do VSC (processo de descarga) ou absorve energia do PAC (processo de carga). A topologia com base na descrição acima está representada nas Figuras 52 e 53.

O efeito da zona morta associada ao controle *droop* pode ser visto na Figura 70. Apesar da natureza distinta entre eles, na qual o primeiro é usado para reduzir a sensibilidade do controlador a pequenas variações durante perturbações; o último impede o BESS de assumir toda a operação de controle de frequência na ocorrência de perturbações. Porém, apesar da diferença intrínseca entre eles a combinação leva a uma resposta dentre dos limites especificados. Como ilustrado na figura citada, que mostra uma comparação entre as duas regiões definidas e posteriormente analisadas, responsáveis de auxiliar na decisão entre os valores propostos. Os possíveis valores adotados em simulação são: $\varepsilon = 0.01$ e $\varepsilon = 0.1$.

Figura 70 – Análise da frequência utilizando controle *droop* com variação na *deadzone*.

Fonte: Próprio autor.

Figura 71 – Análise da potência utilizando controle *droop* com variação na *deadzone*.

Fonte: Próprio autor.

Em ambos os casos com atuação do controle *droop* o desempenho geral do sistema é bastante similar, com limites de frequência dentro da faixa estabelecida e apresentando também perfis de frequência semelhantes. Portanto, ao analisar o comportamento da frequência com relação a potência injeta ou absorvida pelo BESS, é possível concluir com base na Figura 71, que para $\varepsilon = 0.01$ tem-se uma maior ação do BESS no controle da frequência, assim como em $\varepsilon = 0.1$ foi possível estabilizar a frequência dentro da faixa permitida.

O critério estabelecido para definir o valor de ε , que foi utilizado nas simulações, é responsável em reduzir o despacho de potência do gerador à Diesel, diminuindo a contribuição na regulação e restabelecendo a frequência desejada com maior parcela de contribuição do BESS. De fato, no momento de transição nos instantes $t = 8$ e $t = 15$ segundos, os picos encontram-se nas condições de operação e limites de frequência adotados pelo PRODIST Tabela 6, porém ao reestabilizar a frequência do sistema o desvio é mantido em regime permanente.

Ao relacionar as Figuras 70 e 71, conclui-se que o BESS atuando no controle de frequência, não foi capaz definir erro em regime permanente nulo. Assim, as estratégias propostas a seguir terão ação de controle que resulte erro nulo em regime permanente – independente da estratégia *droop* tenha atendido os pré-requisitos PRODIST.

6.1.1.2 Projetando um controlador BELBIC e propondo o PSO para o ajuste dos parâmetros do controlador

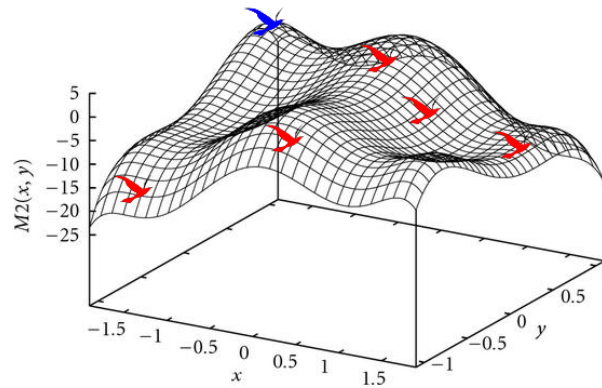
Nesta seção serão exploradas as possibilidades de obter o melhor BELBIC com base no desempenho da resposta da MR. De forma a ilustrar as possibilidades, o Cenário 1 foi a referência para as variações do controlador atuando apenas alterando os parâmetros para avaliar qual deles obteve melhor resposta. Neste caso, o controlador foi submetido as mesmas condições de operações impostas inicialmente; e posteriormente ajustado a partir da obtenção adequada dos parâmetros utilizando o algoritmo de otimização PSO.

O algoritmo implementado gerou um “enxame de partículas” arbitrariamente em um determinado espaço de busca. No conjunto desse espaço, cada partícula correspondeu a possível solução e há uma interação de informações entre indivíduos da população, determinando-se qual trajetória cada uma delas tomou no espaço de busca. Essas partículas, evoluem(atualizam) e mudam suas posições, nesse espaço, conforme sua própria experiência e dos seus vizinhos, registrando a melhor posição visitada por ele o pelo vizinho. Ao realizar uma analogia aos pássaros, eles exploram uma região, determinada pela função objetivo (ou *fitness*), a fim de encontrar a solução ótima para o problema.

Ao considerar a posição da melhor partícula da população como a melhor posição individual, as arestas que não fizeram mais parte dos melhores caminhos são desconsideradas, reduzindo o região de busca do problema. A Figura 72 representa um problema de maximização, onde o pássaro azul é a partícula de solução ótima do problema. Para situações onde se tem um mínimo global, a metaheurística do tipo PSO tem boa aceitação, pois trabalha de maneira

que a exploração do espaço de busca ocorra de forma "inteligente", evitando os mínimos locais. Contudo, vale salientar que para isso, faz-se necessária uma delimitação apropriada do espaço de busca.

Figura 72 – Analogia de um bando de pássaros em um espaço de busca de 3D.



Fonte: (PACHECO, 2016).

Nos processos de otimização, geralmente, um conhecimento prévio do espaço de busca das soluções fornece um melhor desempenho da busca pela solução, aumentando assim, a probabilidade de encontrar-se a solução ótima ou próxima para o problema analisado. Como o problema apresentado nessa tese foi ajustar os parâmetros do controlador BELBIC, sendo que, os próprios autores e a literatura atual não sugerem nenhum método de ajuste desses parâmetros, a proposta foi implementar o PSO para encontrar os parâmetros que se adequariam a cada um dos problemas (cenários) propostos. No que se refere ao problema de sintonia BELBIC, observou-se que o controlador proposto apresentou elevada sensibilidade aos parâmetros k_3 e k_4 , ou seja, pequenas variações nos parâmetros implicaram mudanças evidentes na saída do controlador. A análise prévia do controlador na malha de controle, evidenciou que ambos os parâmetros k_3 e k_4 estão situados em regiões de pequenos valores entre $[0,1]$ e $[0,2]$, respectivamente, de tal forma que o sistema de controle funcione de maneira desejada.

Inicialmente foi realizado empiricamente a definição da região de busca, conforme apresentado na Tabela 21. Assim, os esforços computacionais são amenizados de tal forma que ao observar a resposta do sistema os valores propostos serão validados como aceitáveis ou não. Só então, por meio das simulações, é possível obter a região de busca para a solução da função objetivo do problema de otimização, em que os limites máximo e mínimo são aplicados aos parâmetros (Alfa, Beta, k_1 a k_6) do controlador. Também é possível observar, no Algoritmo 1, as equações da população inicial e velocidade.

No processo de simulação BELBIC usando PSO, a atualização das partículas foi calculada em duas etapas com base nas Equações (33) e (34). Onde os hiperparâmetros estão descritos na Tabela 22.

Tabela 21 – Limites superior e inferior dos parâmetros da função de partícula inicial.

Limites	α	β	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6
LB (Limite inferior)	0	0	10000	0	0	0	9e-7	9e-5
UB (Limite superior)	1	1	30000	1	1	2	1e-6	1e-4

Algoritmo 1: Inicialização PSO

1 for $i \leftarrow 1$ to n do	n - tamanho da partícula
2 for $j \leftarrow 1$ to m do	m - número de variáveis
3 $x_0(i, j) = (LB(j) + rand() * (UB(j) - LB(j)))$	A função cria o enxame inicial
4 end for	
5 end for	
6 $x = x_0$	Vetor população inicial
7 $v = 0, 1 * x_0$	Vetor velocidade inicial

Tabela 22 – Hiperparâmetros do PSO

Parâmetros	Valores	Descrições
m	8	Número de variáveis (α , β , K_1 , K_2 , K_3 , K_4 , K_5 e K_6)
n	-	Tamanho do exame (a ser definido e apresentado posteriormente)
c_1	2	Taxa cognitiva como referência em (SHI; EBERHART, 1998)
c_2	2	Taxa social como referência em (SHI; EBERHART, 1998)
w	0,85	Peso de inércia
$rand$	[0,1]	Número gerado aleatoriamente entre 0 e 1
$pbest_{i,j}^k$		Melhor posição da partícula i na dimensão j no tempo k
$gbest_j^k$		Melhor posição da população do enxame na dimensão j no tempo k

Para determinar o peso inercial w , foram realizados testes com 20 iterações para diferentes valores de w , entre [0,6 | 1,2] (SHI; EBERHART, 1998). O melhor valor verificado nos testes foi de 0,85, que apresentou um melhor equilíbrio com relação à capacidade do algoritmo de realizar buscas locais e globais, minimizando a convergência prematura e permitindo que as partículas se concentrem em torno do ponto de ótimo global de forma mais eficaz.

Os resultados das simulações na aplicação do PSO no ajuste dos parâmetros do controlador BELBIC são apresentados na Tabela 23. Percebe-se que os parâmetros possuem valores de ordens de grandezas distintas diante das influências de cada parâmetro na equação referida, logo os únicos valores predefinidos com restrições dos limites de máximo e mínimo são α e β , cujo valores são compreendidos entre [0,1].

O critério de parada do algoritmo é o número total de iterações 2 (duas). Portanto, o tempo médio decorrido para cada simulação foi de aproximadamente 5 minutos, ou seja, por exemplo: para $n = 50$ perfaz um tempo médio total de 4 horas e 10 minutos de simulação de todas as partículas.

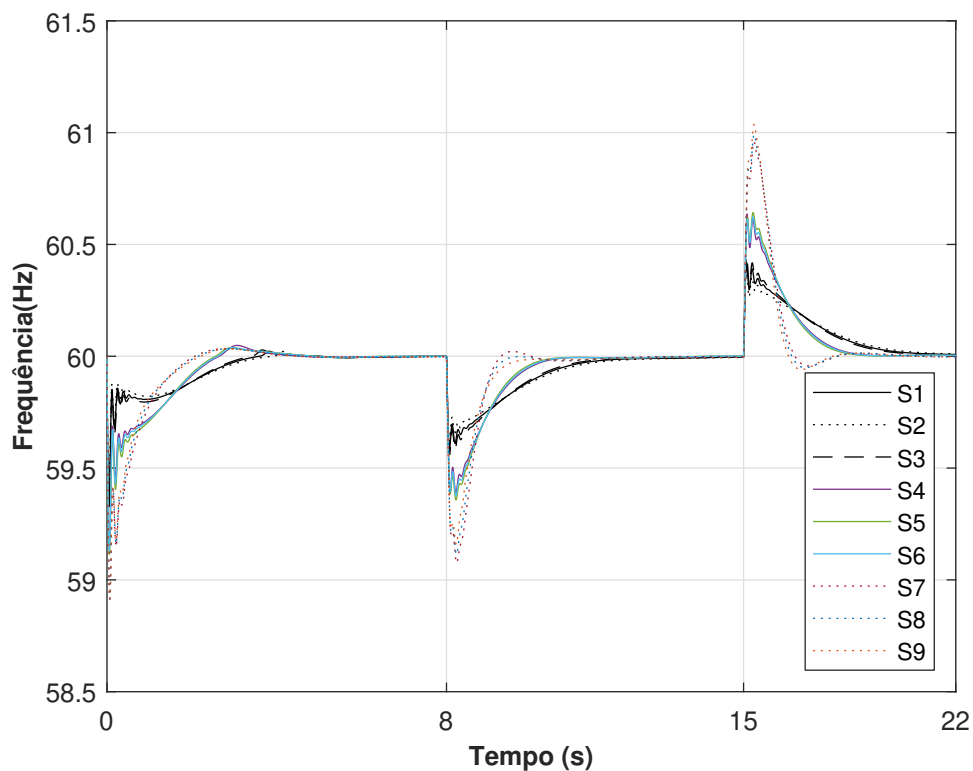
O resultado das simulações podem ser vistos nas Figuras 73 e 74, com base na Tabela 23.

Tabela 23 – Resultados da otimização dos parâmetros utilizando PSO

Simulação	α	β	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6
S_1	1	1	30000	0	0,7852	1,9	1e-6	1e-4
S_2	0,8336	1	35000	1e-5	0,5482	1,9	3,04e-3	8,89e-1
S_3	0,8462	1	26789	1e-5	1	1,4147	9,20e-3	8,61e-1
S_4	0,7389	0,8155	11981	0,8618	0,6370	0,4836	9,62e-4	1e-4
S_5	0,8955	0,5377	10000	0,9399	0,7493	1,4029	9,97e-4	1e-4
S_6	0,8701	0,9234	10000	0,7058	0,8714	0,7	1e-6	1e-4
S_7	0,8701	0,9234	10000	0,7058	0,8714	0,001	1e-6	1e-4
S_8	0,8701	0,9234	18000	0,7058	0,8714	0,001	1e-6	1e-4
S_9	0,8701	0,9234	25000	0,7058	0,8714	0,001	1e-6	1e-4

Vale ressaltar que os valores encontrados possuem valores numéricos muito próximos definidos pela região de busca apresentada na Tabela 21 .

Figura 73 – Simulações do controlador BELBIC para escolha dos parâmetros através do PSO - análise da frequência.



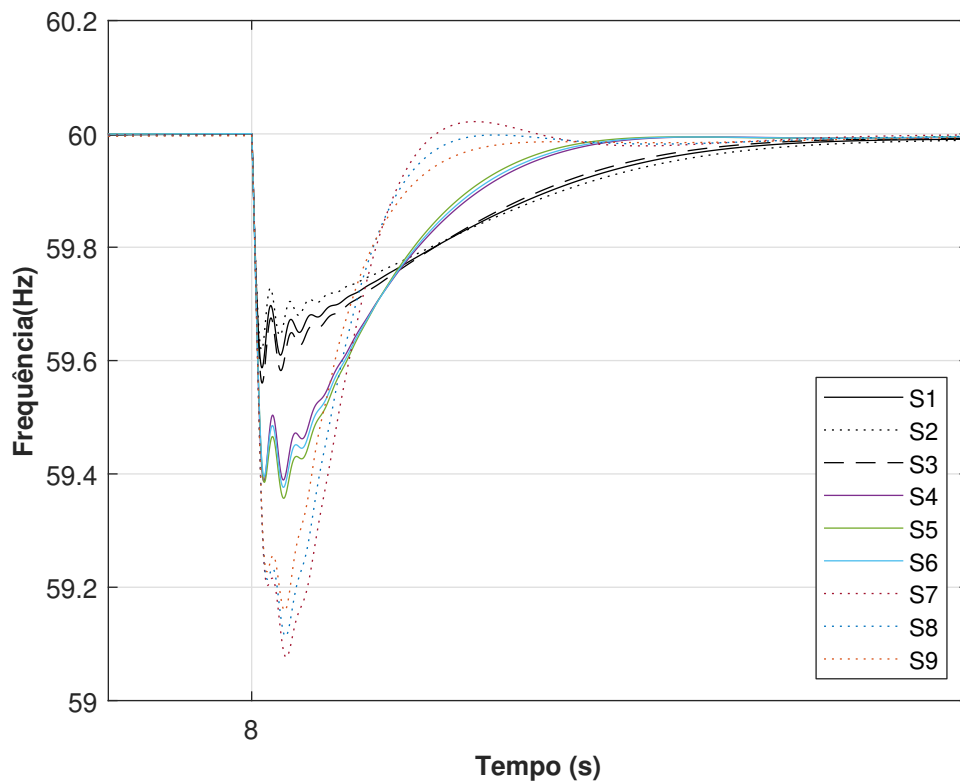
Fonte: Próprio autor.

As simulações para as condições mencionadas na Tabela 23, foram implementadas na MR e os resultados foram analisados de acordo com o comportamento do sistema. Porém, nas simulações S_7 , S_8 e S_9 o PSO não foi utilizado, com o intuito comparativo do autor em propor um ajuste fino dos parâmetros tomando referência a S_6 . Esta simulação havia retornado um ponto de partida ótimo para os parâmetros, apenas a tentativa de ajuste dos novos parâmetros e analisando o comportamento da resposta do sistema. Assim, verifica-se que estes parâmetros

sofreram pequenas alterações no seu valor inicial (em k_1 e k_4), para se adaptar ao comportamento desejado empiricamente com base na resposta do sistema.

A Figura 74 expõe de forma mais detalhada o comportamento da Figura 73. Ao analisar a figura, é possível observar que as simulações de S_4 a S_9 todas as frequência violam as restrições definidas na Tabela 6, que trata dos limites de frequência na ocorrência de distúrbios no sistema - descritos no PRODIST.

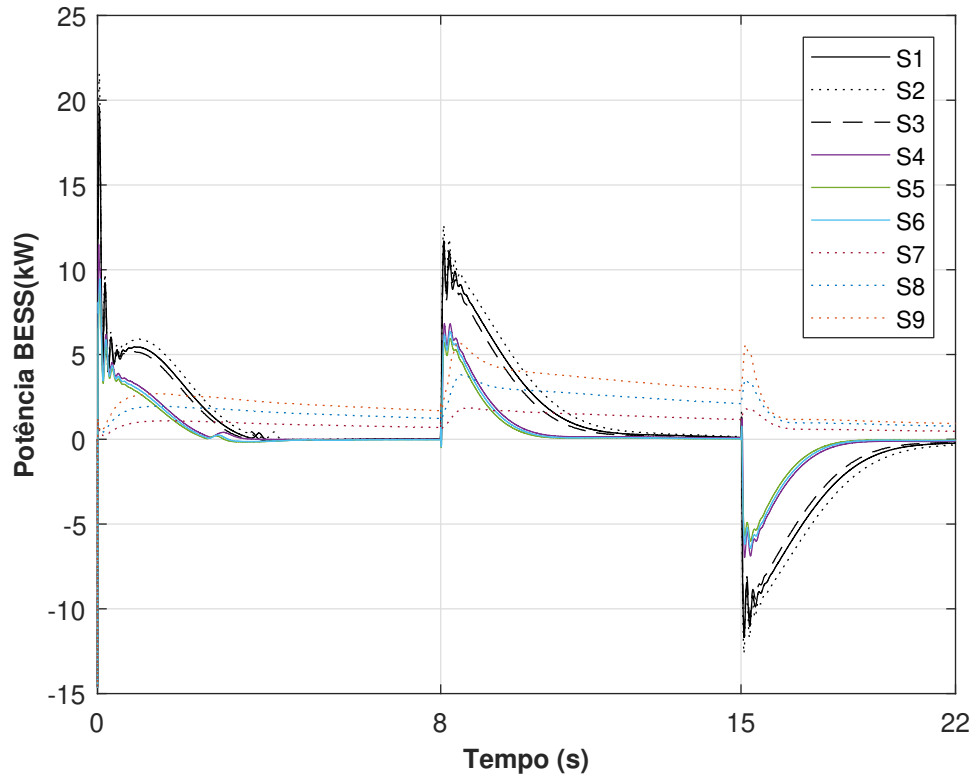
Figura 74 – Simulações do controlador BELBIC para escolha dos parâmetros através do PSO - mais detalhadamente.



Fonte: Próprio autor.

Adicionalmente, outro ponto levado em consideração foi a análise da potência injetada e/ou absorvida pelo BESS nos momentos de transição até estabilizar a frequência. Como observado na Figura 75, o BESS injeta e/ou absorve um maior valor de potência ativa na tentativa de estabilizar a frequência durante a atuação do controlador BELBIC. Portanto, como objetivo do trabalho é utilizar o BESS no controle da frequência, esse objetivo foi alcançado em todas as condições que o controlador foi submetido, diferindo assim apenas nos valores de potência injetada e/ou absorvida ao longo do tempo de simulação definido.

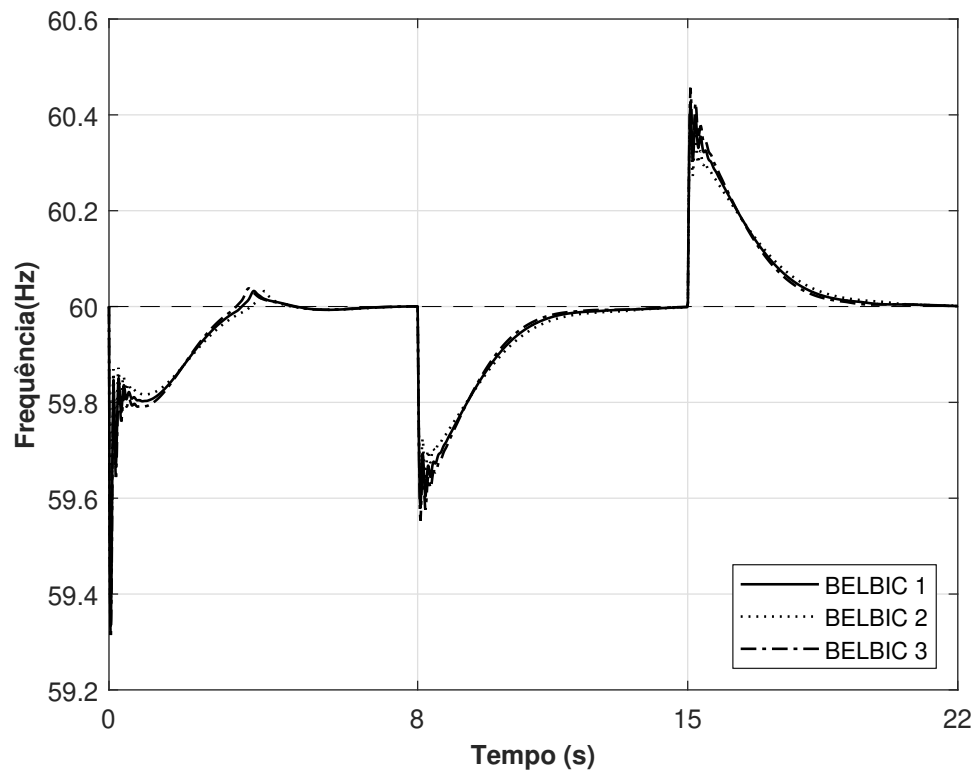
Figura 75 – Simulações do controlador BELBIC para escolha dos parâmetros através do PSO - análise da potência.



Fonte: Próprio autor.

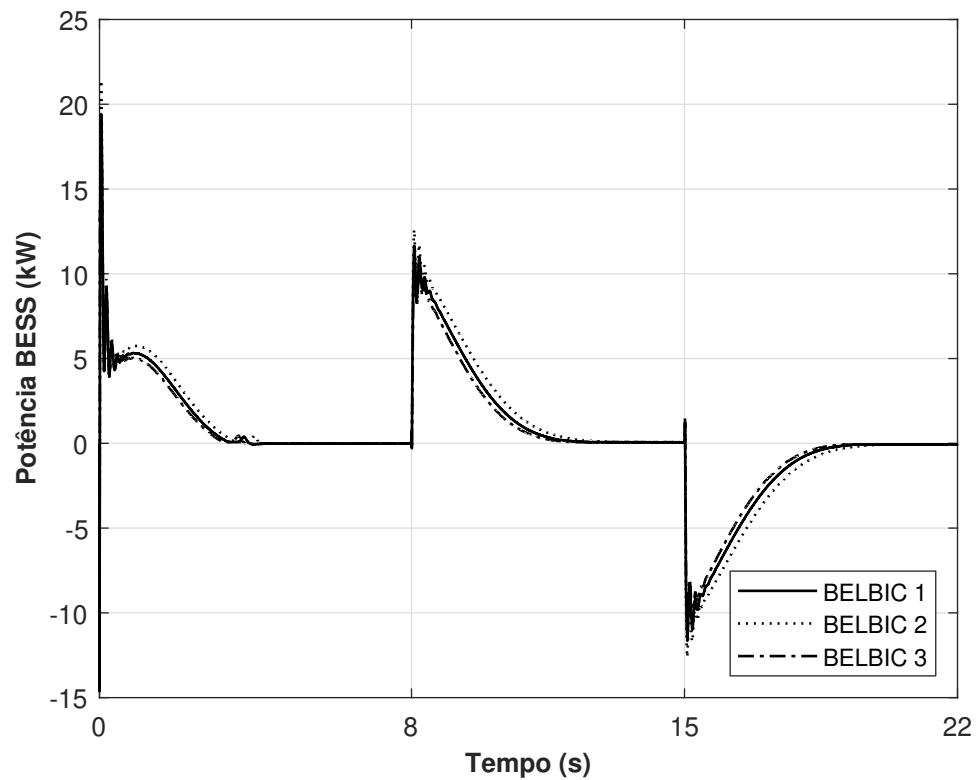
Conforme observado, os valores encontrados dos parâmetros em S_1 , S_2 e S_3 (Figura 76), representam os candidatos a ponto ótimo para a simulação em questão. Como esperado, o algoritmo possui uma rápida convergência para o valor mínimo da função objetivo $J(k)$ como base na Equação 36, geralmente, à medida que o número de partículas aumenta, decorrente do fato de haver uma maior exploração dentro dos espaços de busca das soluções. De acordo com o conceito PSO, quando um indivíduo (partícula) entra num bando, encontra uma região mais atraente (maior número de alimentos) o restante do bando é "avisado"; se os outros indivíduos do bando não conseguirem encontrar uma região melhor, todos convergirão para esse ponto mais favorável.

Figura 76 – Análise da frequência utilizando controlador BELBIC.



Fonte: Próprio autor.

Figura 77 – Análise da potência utilizando controlador BELBIC.



Fonte: Próprio autor.

A seguir são apresentados os resultados da aplicação do PSO no ajuste dos parâmetros do controlador BELBIC (S_1 , S_2 e S_3), otimizando os parâmetros (α , β , k_1 a k_6), que melhor proporcionam uma ação de controle eficiente, a qual é baseada nas características desejadas: rápida resposta na mudança do *setpoint* e estabilidade no valor de referência. A Tabela 24 apresenta os resultados numéricos da otimização por PSO.

Tabela 24 – Resultados da otimização dos parâmetros utilizando PSO - que atendem os critérios.

Simulação	α	β	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6	IAE
S_1	1	1	30000	0	0.7852	1.9	1,00e-06	1,00e-04	2,6995e10
S_2	0.8336	1	35000	1,00e-05	0.5482	1.9	3,04e-03	8,89e-01	3,6744e10
S_3	0.8462	1	26789	1,00e-05	1	14.147	9,20e-03	8,61e-01	2,1525e10

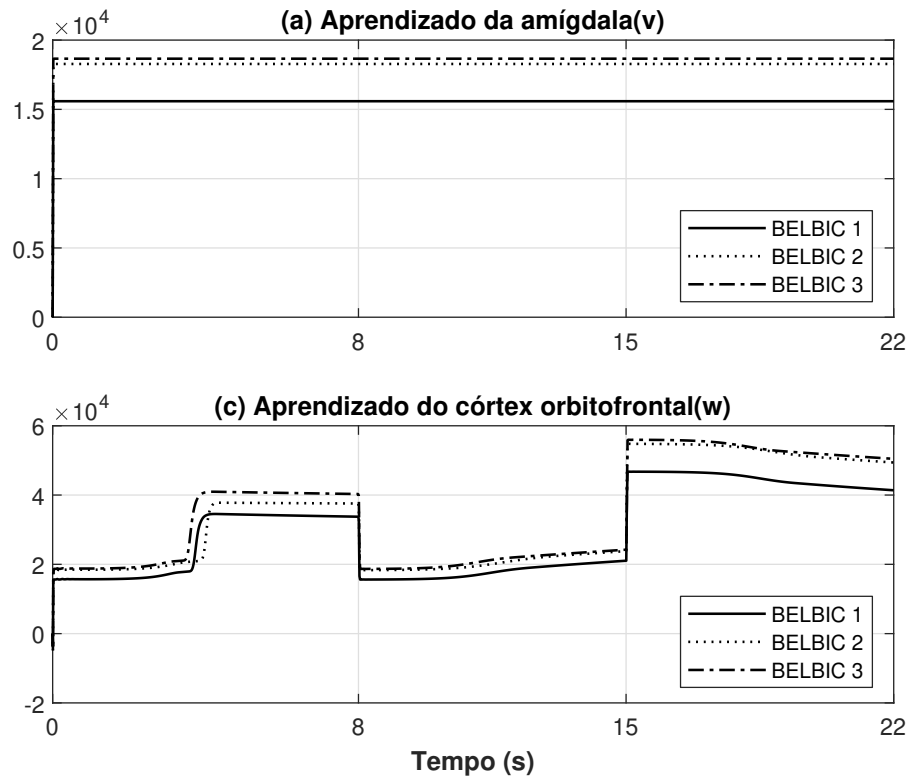
A partir da Tabela 24 e da Figura 76, pode-se observar que o erro acumulado em S_3 foi menor em relação aos obtidos em S_1 e S_2 . Ao observar a situação, permitiu um melhor equilíbrio na estabilidade, evidenciando o fato de que a otimização do controlador por meio do PSO obteve como resultado um controle rápido e estável para a malha de controle da MR. Porém, apesar do tempo de subida (t_r) e o tempo de estabilização (t_s) não serem analisados na tese, a sugestão será, em trabalhos futuros, estudar e analisar essas características para o controle proposto que resulta um controle rápido e estável, além da sua robustez em problemas não lineares.

Na Figura 77 também foi possível comprovar o comportamento já esperado na atuação do controle, em que a potência injetada e absorvida foi definida pelo controle, neste caso o controle mais refinado (ajuste fino realizado através do PSO) comprova o acompanhamento de potência na acomodação da frequência, respeitados os critérios impostos pelo controlador.

As Figuras 78 e 79 apresentam o comportamento dos módulos de aprendizado da amígdala, córtex e os sinais produzidos nesse controlador, respectivamente. A resposta do controle BELBIC depende dos estímulos sensorial e emocional recebidos por ele. Como consequência, a velocidade de resposta do controlador, bem como sua adaptação, depende do aprendizado da amígdala e córtex.

Ao analisar a Figura 78, nota-se o comportamento monotônico da amígdala, assim como esperado. Apesar de ocorrer um variação no sinal do reforço (emocional), o aprendizado da amígdala(v) encontra-se estável (Figura 78 (a)). Por outro lado, o comportamento do aprendizado do córtex orbitofrontal também condiz com o esperado, uma vez que este age para reprimir o "excesso" da amígdala. Comprovando a descrição apresentada anteriormente no capítulo 4, onde o aprendizado da amígdala nunca diminui, pois uma vez aprendida a reação emocional deverá permanecer, sendo a tarefa do córtex orbitofrontal inibir esta reação quando é inadequada variando os seus valores em positivos e negativos, conforme necessário para rastrear a inibição.

Figura 78 – Pesos dos BELBIC.

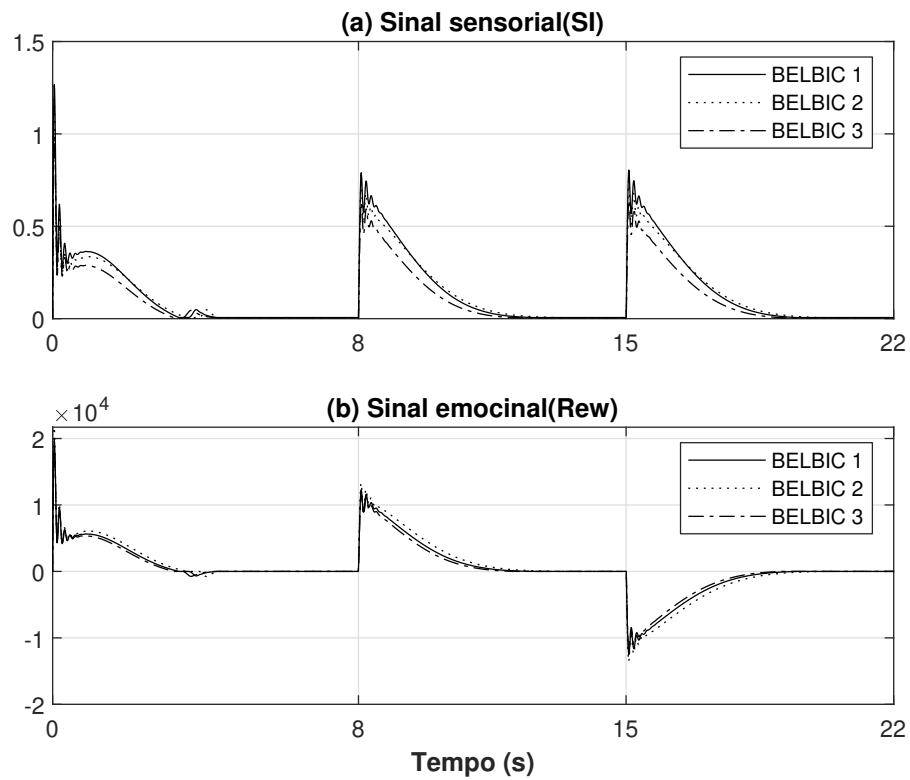


Fonte: Próprio autor.

De fato, em casos onde os valores negativos produzidos são causados pelos altos efeitos inibitórios do córtex orbitofrontal que não só neutralizam os efeitos excitatórios da amígdala mas também produzem respostas negativas sempre que o sinal emocional é de magnitude negativa.

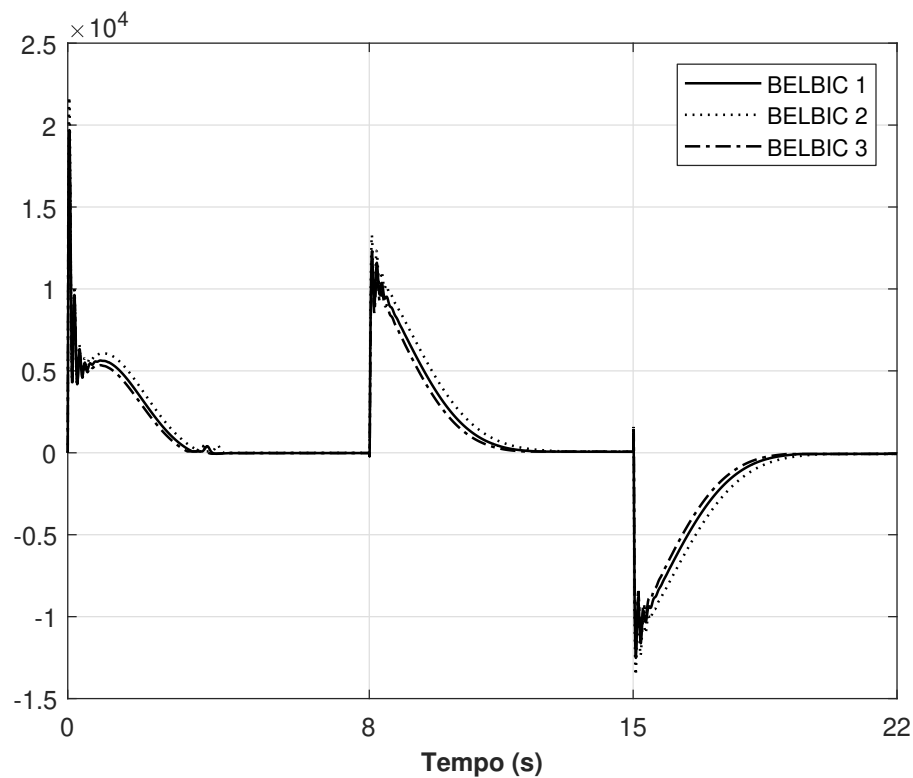
No caso das Figuras 79 e 80, foi possível notar a característica dos estímulos produzidos a consequente sinal de controle final, produzido pelo módulo BEL. Neste caso é possível notar impulsos nos sinais mediante a mudanças no valores de referência (rápida percepção emocional), evidenciada no valor final do sinal de controle (MO – Equação 26).

Figura 79 – Sinais dos controladores BELBIC.



Fonte: Próprio autor.

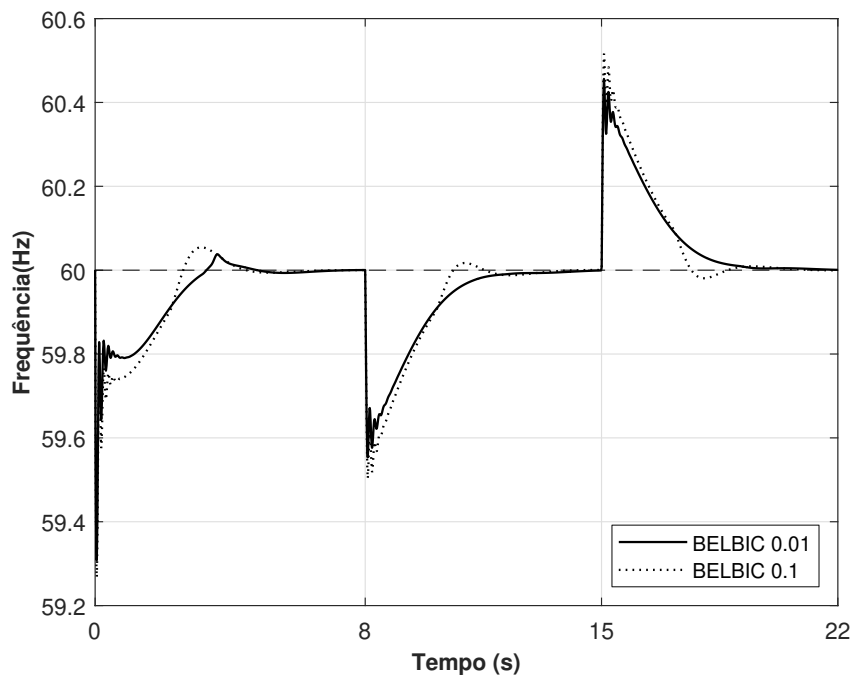
Figura 80 – Sinais de saída(MO) dos controladores BELBIC.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 69 mostrou o diagrama de controle implementado com a inclusão de uma *deadzone* no sinal de entrada. A técnica utilizada foi explicada de forma detalhada na seção 6.1.1.1. Como esperando, ao analisar as Figuras 81 e 82, observa-se que há uma semelhança no comportamento, e sua explicação é análoga a apresentada na seção citada. Em ambos os casos, com a atuação do controlador BELBIC, analisando as condições de *deadzone*, o desempenho geral do sistema foi satisfatório e não infringe os valores estabelecidos na Tabela 6. Portanto ao analisar o comportamento com relação a potência, foi possível concluir com base na Figura 81, que para $\varepsilon = 0.01$ tem-se uma maior ação do BESS no controle da frequência, assim como em $\varepsilon = 0.1$, que também é possível estabilizar a frequência dentro da faixa permitida.

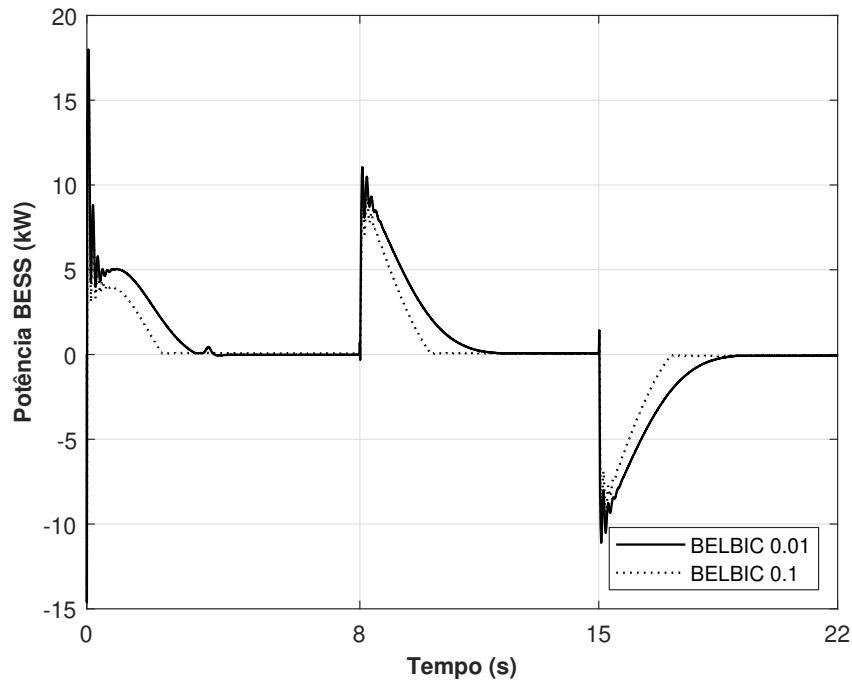
Figura 81 – Análise da frequência utilizando controle BELBIC com variação na *deadzone*.



Fonte: Próprio autor.

O critério estabelecido para definir o valor de ε , foi também reduzir o despacho de potência do gerador à Diesel, diminuindo a contribuição na regulação e restabelecendo da frequência desejada com maior parcela de contribuição do BESS. De fato, no momento de transição nos instantes $t = 8$ e $t = 15$ segundos, os picos encontram-se nas condições de operação e limites de frequência adotados pelo PRODIST Tabela 6, porém ao reestabilizar a frequência do sistema o desvio é mantido em regime permanente.

Figura 82 – Análise da potência utilizando controle BELBIC com variação na deadzone.



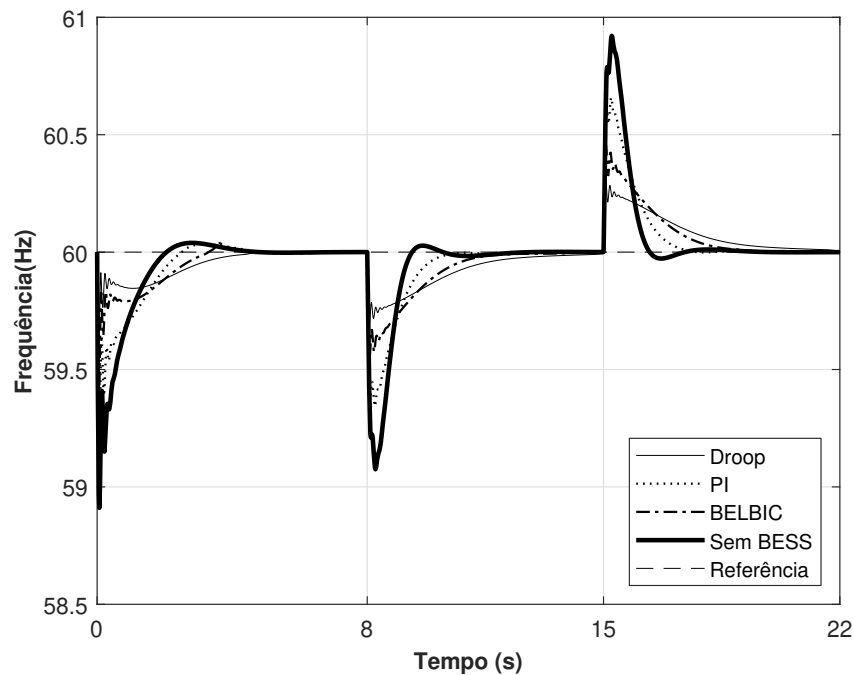
Fonte: Próprio autor.

Ao relacionar as Figuras 81 e 82, conclui-se que o BESS atuando no controle de frequência foi capaz de minimizar o erro em regime permanente - praticamente nulo, e a ocorrência de sobressinais em regimes transitórios. Assim, a estratégia de controle proposta BELBIC, comportando-se como controle primário e secundário, resultou em regime permanente erro nulo, ao contrário do controle *droop* apresentado.

6.1.1.3 Comparativo entre os controladores utilizados

De forma a avaliar o comportamento dos controladores propostos na tese, aplicam-se as condições de variação de cargas impostas no Cenário 1. A Figura 83 apresenta o comportamento dos controladores *droop*, PI, BELBIC; além da resposta do sistema sem BESS diante dos distúrbios na MR.

Figura 83 – Comparativo da frequência da MR entre os controles.



Fonte: Próprio autor.

O resultado da simulação evidencia que o controlador BELBIC, assim como o *droop*, possuem comportamentos similares, como já mencionados anteriormente de forma individual. O *droop* atuando como controle primário possui erro em regime permanente, claramente para o sistema proposto, foi necessário a aplicação de um controle secundário para eliminar esse erro. Porém, a proposta do controlador BELBIC como controle secundário e primário conseguiu atender a condição de erro nulo em regime permanente, e não viola a condição de desvio de frequência. Um ponto relevante desse controle é a sua rápida ação de controle e sua rápida adaptação aos distúrbios independente da magnitude. Em relação aos outros dois resultados apresentados, percebeu-se que o PI ultrapassou os valores estabelecidos em regime transitório, mesmo observando sua capacidade de atuar como controle secundário em combinação com o controle *droop* – vasta aplicação na literatura, com isso o controle atendeu parcialmente a proposta. O resultado apresentado não possui parcela de contribuição do BESS, como esperando o Gerador à Diesel fará o seu papel do controle (Figura 65) atendendo aos critérios de estabilidade de forma mais lenta, se comparado quando o BESS atuando como suporte de potência, com isso percebeu-se que infringindo em alguns pontos o desvio de frequência estabelecido.

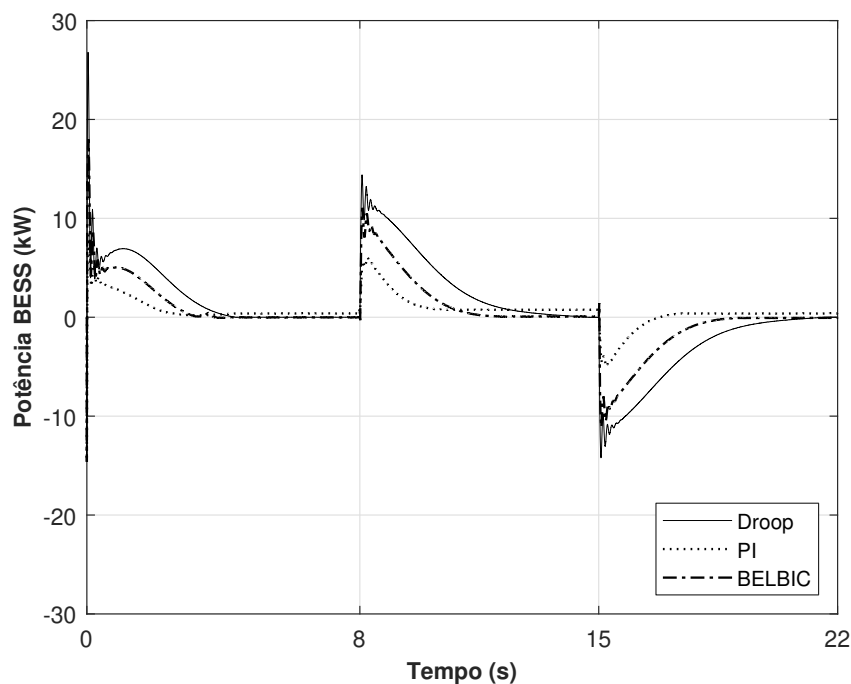
Como descrito anteriormente, diversas técnicas e métodos podem ser aplicados para o controle de frequência, algumas delas apresentadas na Seção 5.3.

A Figura 83 demonstra que todos os controladores obtiveram resultados satisfatórios em reprimir os distúrbios, mas apenas o *droop* e BELBIC ficaram dentro da faixa de operação desejada. Entretanto, ao analisar a Figura 84 que tratada da potência injetada ou absorvida pelo

BESS e relacionar com a Figura 83, claramente é visto que o comportamento do BESS possui variações a depender do tipo de controlador utilizado.

No caso do *droop* e PI, em ambos, a operação contínua do BESS independe de estabilizar a frequência da MR, visto que o erro em regime permanente é um comportamento já esperado e discutindo anteriormente. De fato o controlador *droop* é bastante difundido na literatura como controle primário, e ao combiná-lo com um controle secundário à situação poderá ser contornada - a depender dos casos, assim como o caso do PI atuando como controle secundário associado ao *droop*. Por outro lado, como o fruto dessa tese é propor um controle robusto capaz de ajustar o desvio de frequência e também minimizar o uso do BESS na ocorrência de desbalanço de carga e geração, o objetivo mais uma vez foi alcançado ao comparar os três controladores abordados. Dessa forma, o BELBIC mostrou-se como uma proposta adequada e com benefício de minimizar o uso do BESS no controle de frequência de MR utilizando sistemas de armazenamento em baterias.

Figura 84 – Comparativo da potência do BESS(injetada/absorvida) entre os controles.



Fonte: Próprio autor.

Em trabalhos futuros, o autor propõe avaliar a performance dos controladores sob condições de distúrbios, utilizando os critérios de avaliação da performance do erro ISE¹, IAE² e ITAE³. Além de uma análise dos requisitos de desempenho do controlador, mediante a aplicação do sinal degrau ao sistema para obter os principais índices associados à resposta ao degrau, que

¹ Do inglês *Integral of square error* ou Integral do erro quadrático.

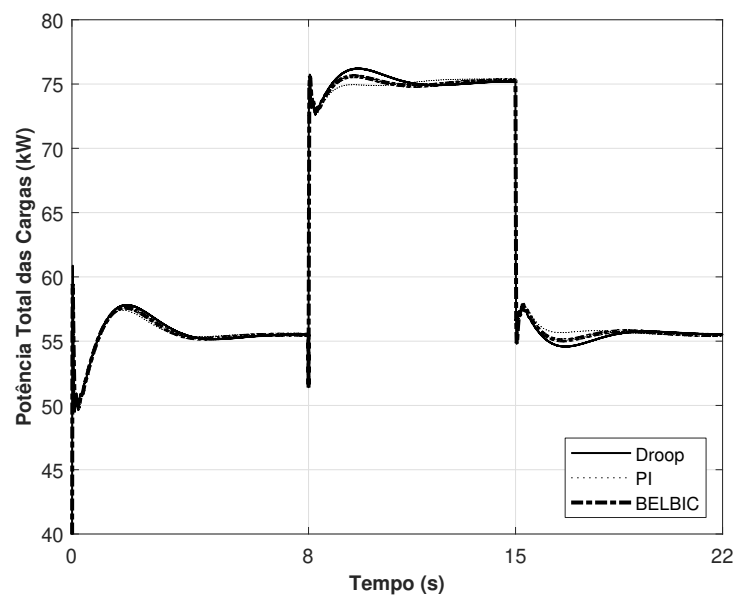
² Do inglês *Integral of absolute error* ou Integral do erro absoluto.

³ Do inglês *Integral of time multiplied by the absolute value of error* ou Integral de tempo multiplicado pelo valor absoluto do erro.

são: sobressinal(*overshoot* em %), tempo de subida(t_r - *rise time* em s), tempo de acomodação(t_s - *settling time* em s) e erro estacionário (%).

A Figura 85 traz os resultados alcançados de potência ativa total nas cargas. Comparando a Figura 83 e a Figura 85, foi possível verificar a alteração dinâmica causada pela alternância entre os controladores (*droop*, PI e BELBIC). Ao analisar a figura, houve notável redução no amortecimento da potência ativa total das cargas. Adicionalmente, os três controles passaram a apresentar dinâmica muito similares, mesmo em topologias de controle primário; e primário e secundário concatenados.

Figura 85 – Potência total das cargas entre os controles .



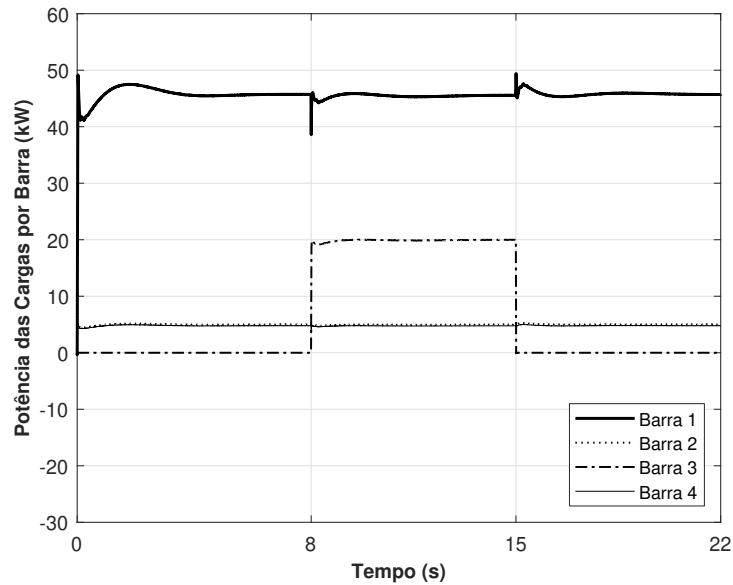
Fonte: Próprio autor.

Ainda no contexto da regulação de frequência, outra forma seria a regulação por meio de estratégias de corte de carga. Essa estratégia visa manter o equilíbrio entre as potências elétrica e mecânica, sob determinadas condições de subfrequência. Visto que, perdas significativas de geração podem levar a frequência do sistema a valores que geram instabilidade do sistema. Em situações críticas de subfrequência, as cargas devem ser cortadas no intuito de manter a frequência dentro dos limites dos equipamentos de proteção. No caso brasileiro, o ONS implanta o Esquema Regional de Alívio de Carga (ERAC) para efetuar o desligamento automático de blocos de carga e garantir a confiabilidade do sistema e qualidade da energia entregue aos consumidores.

Ao tratar de operação no modo ilhado, na ocorrência de pequenos transitórios de tensão e frequência, o desempenho dinâmico é muito relacionado ao tempo de duração da falta e ao tamanho de carga ilhada. Para situações de colapso na sobrecarga, é sugerido a utilização de sistemas automáticos de alívio (*load shedding*), como apresentado em (HUAYLLAS; RAMOS; ARNEZ, 2014), assim como no trabalho de (NADAI et al., 2016).

No Cenário 1, o modelo encontra-se no modo ilhado e a Tabela 20 traz os valores definidos das cargas. A simulação e comportamento da potência ativa nas barras é mostrada na Figura 86, esse comportamento ocorreu durante a operação da MR junta ao controlador BELBIC. A carga 3 é uma carga que não tem aplicação em regime contínuo de operação, cuja entrada e saída são definidas nos instantes de tempo $t = 8s$ e $t = 15s$, respectivamente.

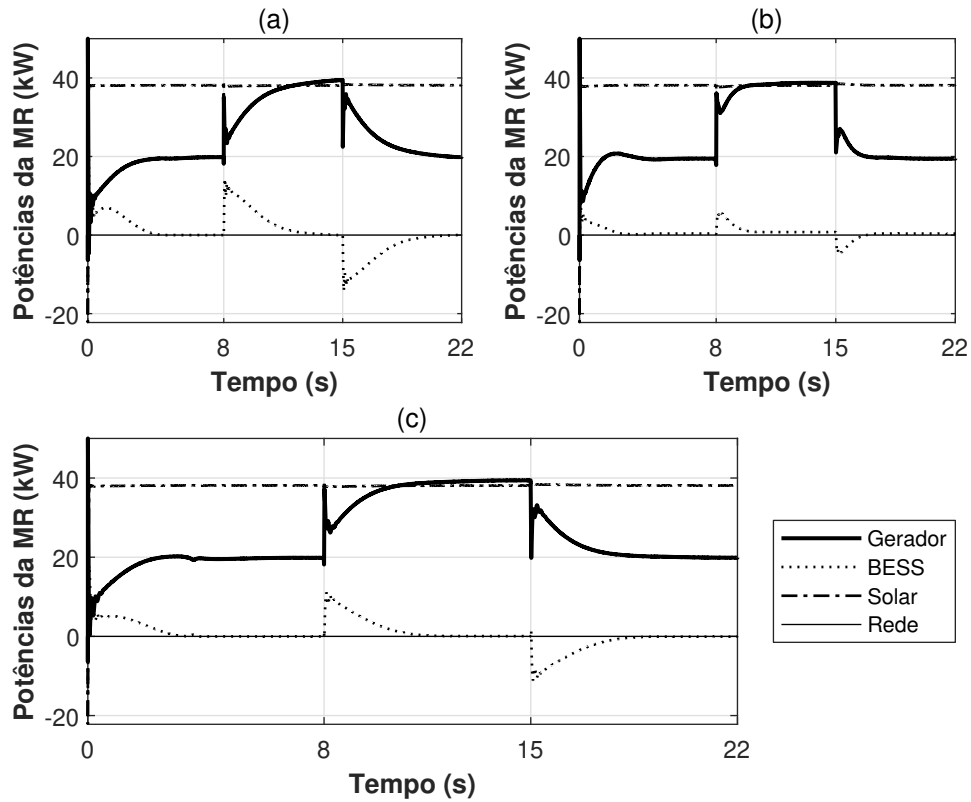
Figura 86 – Potências nas barras nas cargas.



Fonte: Próprio autor.

Nota-se que a MR atende às necessidades das cargas de forma apropriada sem haver a necessidade de corte de carga. A MR encontrou-se equilibrada em relação ao balanço carga-geração. Ao ocorrer o ilhamento, haverá um desequilíbrio entre a potência gerada e a carga consumida. Nesse instante, o método proposto atua para calcular a frequência pós ilhamento e redistribuir o despacho de potência ativa do gerador e BESS a fim de minimizar o desvio de frequência e as perdas de potência ativa. A Figura 87 explora os resultados obtidos nas simulações em condições de operação idênticas para os três controladores: (a) *droop*, (b) PI e (c) BELBIC.

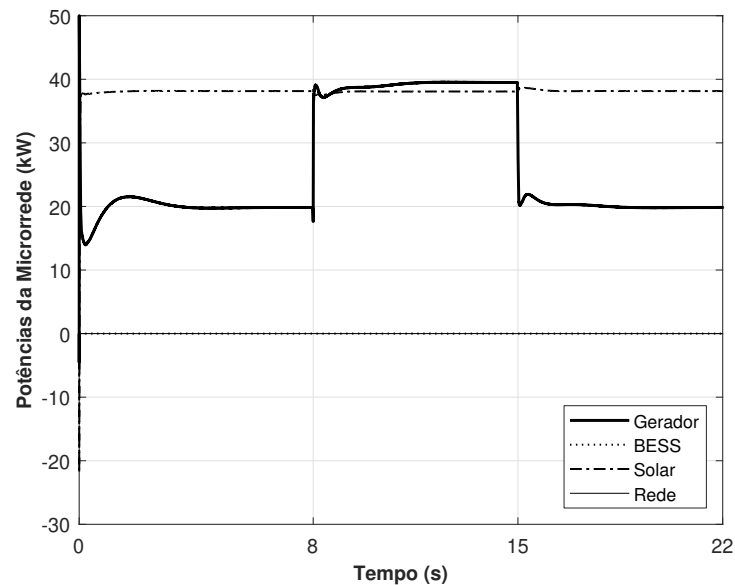
O resultado apresentado na Figura 87 (a) mostra um comportamento similar a Figura 87 (c), entretanto há uma maior contribuição do BESS na estabilização do desvio de frequência da MR, consequentemente uma menor atuação do gerador. Já na Figura 87 (b), praticamente o gerador influencia com maior parcela na estabilidade do sistema em comparação ao BESS nas outras duas condições citadas. Vali salientar que nas três condições a geração fotovoltaica foi mantida constante.

Figura 87 – Comportamento das potências da MR utilizando os controles (a) *Droop*, (b) PI e (c) BELBIC.

Fonte: Próprio autor.

Uma outra condição apresentada para a análise da influência da potência ativa na ausência de um BESS é apresentada na Figura 88. A unidade geradora possui mecanismo regulador de velocidade que atuam para modificar a potência gerada em função da variação de frequência. Portanto, quando há uma redução instantânea na frequência do sistema, motivada por um aumento de carga, o regulador de velocidade atua para elevar a geração de potência das unidades.

Figura 88 – Comportamento das potências da microrrede sem o BESS.



Fonte: Próprio autor.

Em rede elétrica convencional, quando ocorre algum desbalanço entre a potência gerada pelas fontes e a carga, a energia das massas girantes é instantaneamente usada para auxiliar no balanço energético. Já em MRs há um comportamento diferente, especialmente decorrido da presença significativa de interfaces eletrônicas, que se têm baixa inércia. Ao considerar uma operação isolada, isso pode acarretar consideráveis desvios na frequência se um mecanismo de controle apropriado não for implementado.

6.1.1.4 Grandezas elétricas do Gerador à Diesel

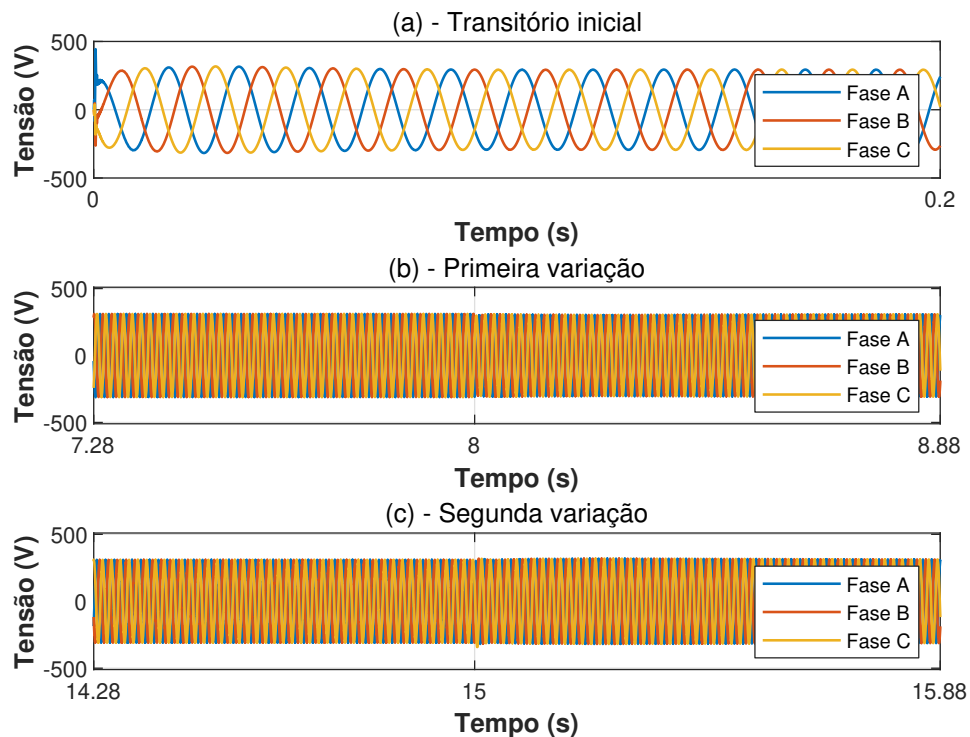
Ao retratar a Figura 87, no estágio inicial da MR - em que o modo de operação é ilhado - o gerador à Diesel entrou em operação tentando atender as cargas e estabilizar a frequência da rede e a tensão, e toda a produção de energia inicial e adicional é suprida parcialmente por ele. A unidade geradora integra um mecanismo regulador de velocidade que atua para alterar a potência gerada em função da variação de frequência. Portanto, quando há uma redução instantânea na frequência do sistema, motivada por um aumento de carga, o regulador de velocidade atua para elevar a geração de potência das unidades. Entretanto, as outras fontes que constituem a MR deram suporte, neste caso, o sistema fotovoltaico rastreado a irradiação e sua potência de saída oscila no tempo caso haja variação na irradiação; e o sistema de armazenamento por sua vez, injetou ou absorveu energia definida pelo controle de frequência, como pode ser visto na Figura 53.

Ainda de acordo com a Figura 87, no transitório inicial, os controles já começam a atuar e a frequência da MR inicia a estabilização com base no fluxo de potência. Portanto, o gerador absorve ou libera sua energia cinética para lidar com a frequência desvios, esta etapa é chamada

de resposta de inércia. As Figuras 89(a) e 90(b) apresentam essa fase inicial. Considerando que, no segundo estágio (b), a frequência é estabilizada e restaurada ao limite de frequência nominal por possuir um controle primário ou secundário controlando a frequência. A resposta dos controladores envolve a regulação de potência ativa.

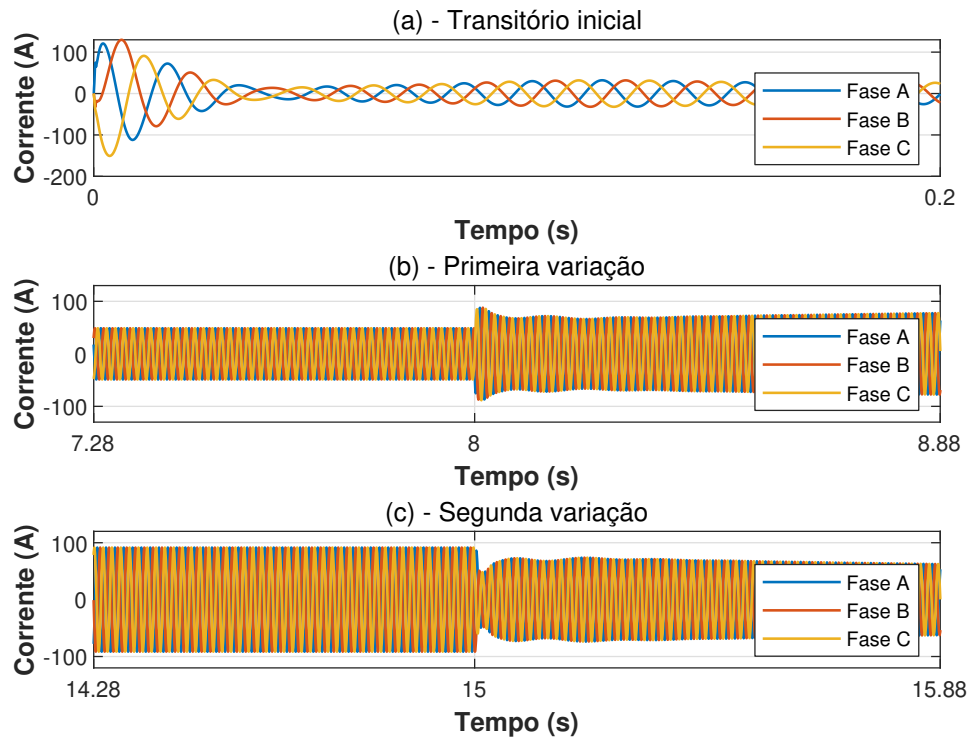
No estado estacionário da MR, a geração total é igual à demanda total de carga do sistema, que inclui as perdas das linhas. No entanto, no instante ($t = 8s$ e $t = 15s$), como ocorreu uma variação de carga repentina, a potência de saída aumenta para realize o equilíbrio de energia e elimine a incompatibilidade de energia. Em $t = 8s$, a tensão sofreu uma leve queda instantânea após a mudança repentina de carga, posteriormente retornou ao seu valor nominal através da aplicação do controle. A tensão de saída foi estável com a amplitude esperada e a corrente de saída aumentou e diminuiu a depender da demanda.

Figura 89 – Tensão trifásica do gerador.



Fonte: Próprio autor.

Figura 90 – Corrente trifásica do gerador.



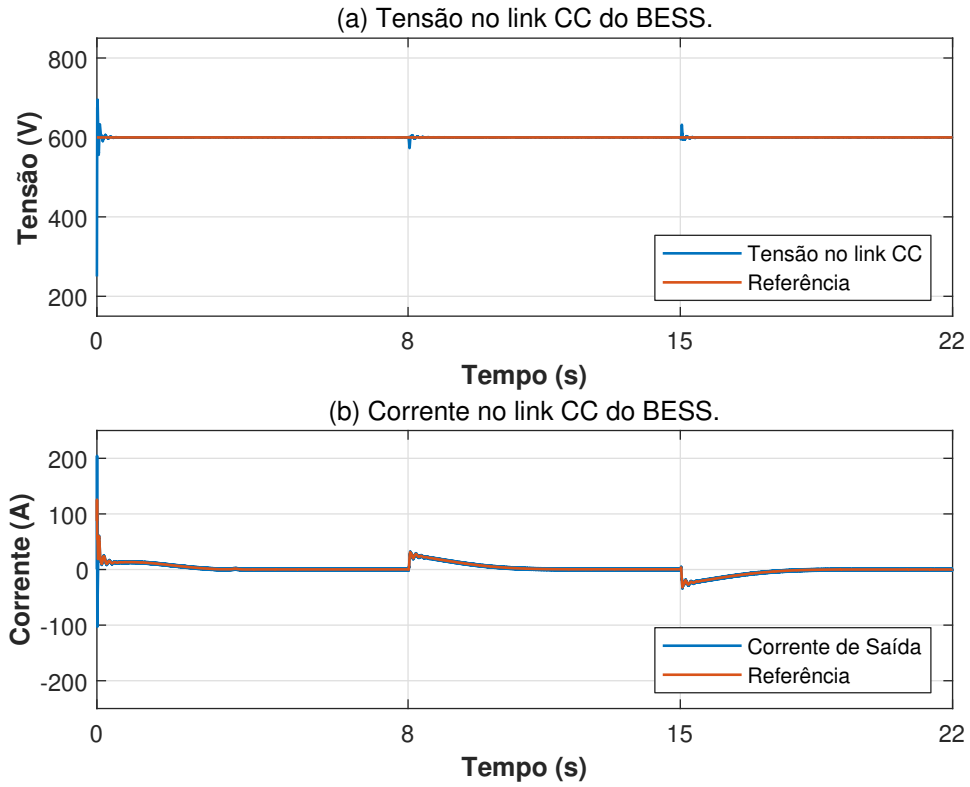
Fonte: Próprio autor.

6.1.1.5 Análise dos resultados do controle utilizando o BESS

Ao simular no modo ilhamento, o controlador BELBIC tem como finalidades estabilizar à frequência da MR e compartilhar potência ativa em regime permanente - quando necessário. Este nível de controle é realizado pelo BESS operando no modo *grid-supporting*. O VSC neste modo de operação, é controlado como uma fonte de corrente, apresentado na Figura 28; e tem como funcionalidade atender a dinâmica da MR. O sistema de controle do VSC, que conecta o BESS à MR, foi implementado com base no modo *grid-supporting* e apresentado anteriormente na Figura 32.

Como apresentado na Figura 32, o modelo do BESS, foi projetado com uma bateria no link CC e a saída do VSC conectada ao PAC (Figura 53). Um indutor é utilizado na entrada do conversor CC/CC para limitar o *ripple* de corrente (BAZARGAN; BAHRANI; FILIZADEH, 2018; FARROKHABADI et al., 2017); e o conversor CC/CC utilizado é bidirecional do tipo *buck/boost* (modelo chaveado), responsável em elevar o nível da tensão das baterias e regular a tensão do link CC, carregando e descarregando adequadamente a bateria, como pode ser visto de forma geral na Figura 91 e detalhada na Figura 92.

Figura 91 – Tensão do BESS durante a simulação.



Fonte: Próprio autor.

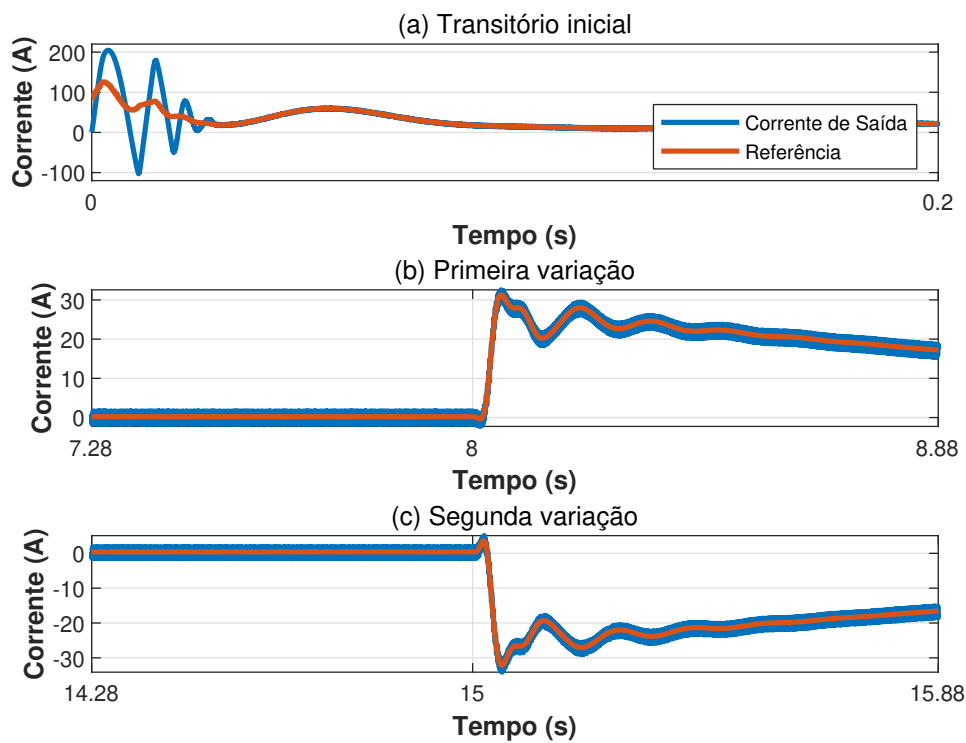
Ao analisar o controle de potência da bateria na Figura 32, este consiste em dois controladores PI concatenados, cuja Equação 15 definida para o controle de corrente e Equação 16 para o controle de tensão. Os valores adotados nas simulações foram: $V_{ccref} = 600V$; no controle de corrente $K_p = 0,25$ e $K_i = 50$; no controle da corrente tensão $K_p = 0,005$ e $K_i = 10$. O ajuste dos controladores foram de forma empírica (com base em simulações anteriores), porém métodos de ajustes podem ser encontrados em (MUKHERJEE; STRICKLAND, 2015a; MUKHERJEE; STRICKLAND, 2015b; FARROKHABADI et al., 2017). Lembrando que os dados da bateria são: $V = 360V$, Capacidade nominal = $50Ah$ e estado inicial de carga = 45% ; complementarmente outra informação é extraída do *Simulink* e fundamental para a representação mais fidedigna do modelo proposto, que é a corrente de descarga nominal $i_{descarg} = 217A$.

Ainda relacionado a análise da Figura 32, o controle concatenado fornece o *duty cycle* para as chaves do conversor CC/CC, com base no desvio da tensão V_{cc} e o valor V_{ccref} (MUKHERJEE; STRICKLAND, 2015a; MUKHERJEE; STRICKLAND, 2015b; FARROKHABADI et al., 2017)). Visto que o sinal de saída do controlador concatenado é a tensão de referência da bateria V_{batref} , o bloco "Gerador d_c " calcula o valor de d_c usando V_{batref} e o valor atual de V_{cc} .

Nas Figuras 91 e, detalhadamente a corrente, na Figura 92, é possível notar que a dinâmica do controle de potência fornecida pela bateria no modelo da Figura 32 ocorre no

link CC. Há claramente três estágios definidos e apresentados os comportamentos distintos. No momento mostrado na Figura 91(a) e (b) - evidência na Figura 92(a) à corrente, observa-se o transitório inicial que rapidamente o controle atua e estabilizam os sinais. No segundo instante, Figura 92(b), o momento que a carga sofre aumento ($t = 8s$), o VSC injeta potência no PAC, e a potência P_{vsc} flui da bateria para o VSC, de modo que o conversor CC/CC opera no modo *boost*, descarregando a bateria. Já no terceiro instante, Figura 92(c), a carga sofre diminuição ($t = 15s$), o VSC absorve potência do PAC, o P_{vsc} flui do VSC para a bateria, e o conversor CC/CC opera no modo *buck*, carregando a bateria. A análise do estado de carga da bateria será apresentado a seguir.

Figura 92 – Corrente do link CC do BESS durante a simulação.



Fonte: Próprio autor.

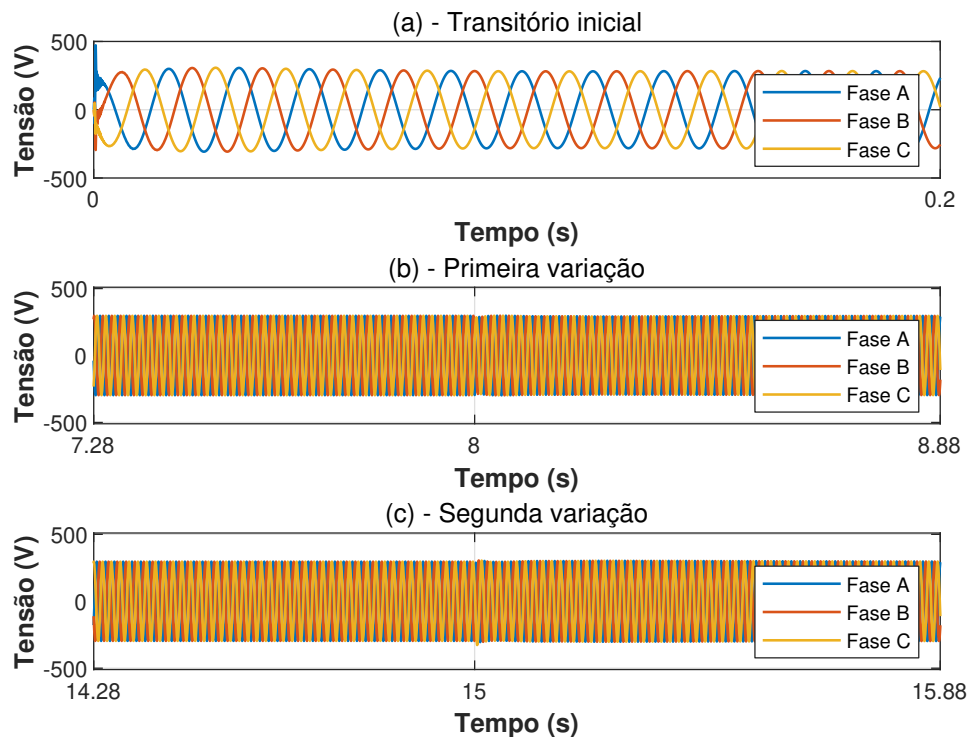
Considerando que o VSC fornece energia para o PAC, quando a potência P_{vsc} demandada pelo VSC aumenta e se torna maior que a potência P_{bat} fornecida pela bateria, a sua tensão V_{cc} diminui e torna-se menor do que o valor de referência, assim o controle de potência da bateria atua para aumentar a potência P_{bat} . No momento em que o P_{vsc} diminui e tornando-se menor que P_{bat} , o V_{cc} aumenta e torna-se maior do que sua referência, assim o controle de potência da bateria atua para diminuir P_{bat} . O equilíbrio é obtido ao considerar $P_{vsc} = P_{bat}$ e quando V_{cc} é igual ao seu valor de referência. Com isso, o VSC opera no modo *grid-supporting* (Figura 27) e controla a frequência da MR, usando o controle de potência para operar em paralelo com outros conversores.

As Figuras 93 e 94 mostram os gráficos do ação dinâmica da tensão e corrente no VSC do

BESS. O comportamento da tensão CC, visto na Figura 91, exibe a tensão terminal sofre pequenas variações nos instantes de variação de carga. No modelo, esta tensão é dinâmica e responde às variações de carga após o VSC estar operando em modo *grid-supporting*. Estas variações são refletidas para as grandezas do lado CA do VSC, observando-se oscilações transitórias de corrente e potência ativa. Em consequência, há um tempo de estabilização dos transitórios e uma resposta adequada para a corrente e tensão, consequentemente da potência ativa fornecida para a MR.

Na Figura 93, tem-se a dinâmica da tensão no PAC. No momento do aumento de carga, a tensão oscila minuciosamente e rapidamente retornar ao valor nominal, do contrário, o mesmo comportamento acontece, porém com oscila de aumento discreto. Sendo a carga linear não há distorção na tensão.

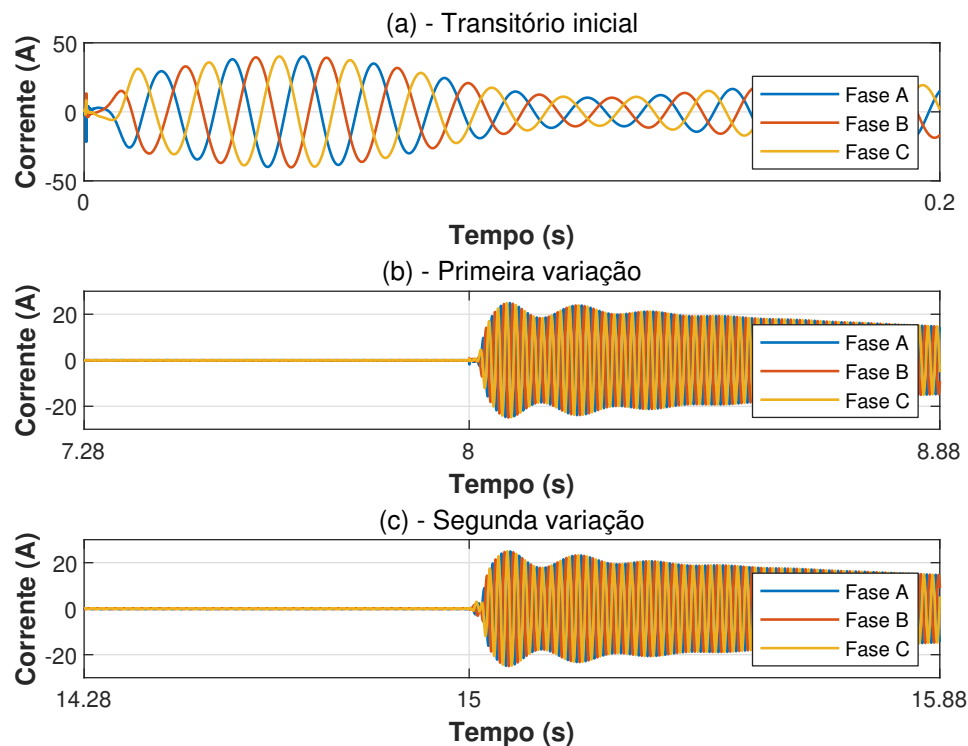
Figura 93 – Tensão do BESS durante a simulação.



Fonte: Próprio autor.

Visto na Figura 94 que o modelo possui o comportamento ideal, como proposto, de não injetar ou absorver potência ativa na MR de forma contínua, ficando a critério do controlador BELBIC definir a potência injetada/absorvida. Essa relação tem influência direta no estado de carga da bateria - que será abordada posteriormente. O controle de potência depende diretamente do controle da frequência da MR, com isso ao atender o critério estabelecido ao longo da Seção 6.1.1.2 o BELBIC se mostrou como uma alternativa viável para o controle de frequência em MR.

Figura 94 – Corrente do BESS durante a simulação.



Fonte: Próprio autor.

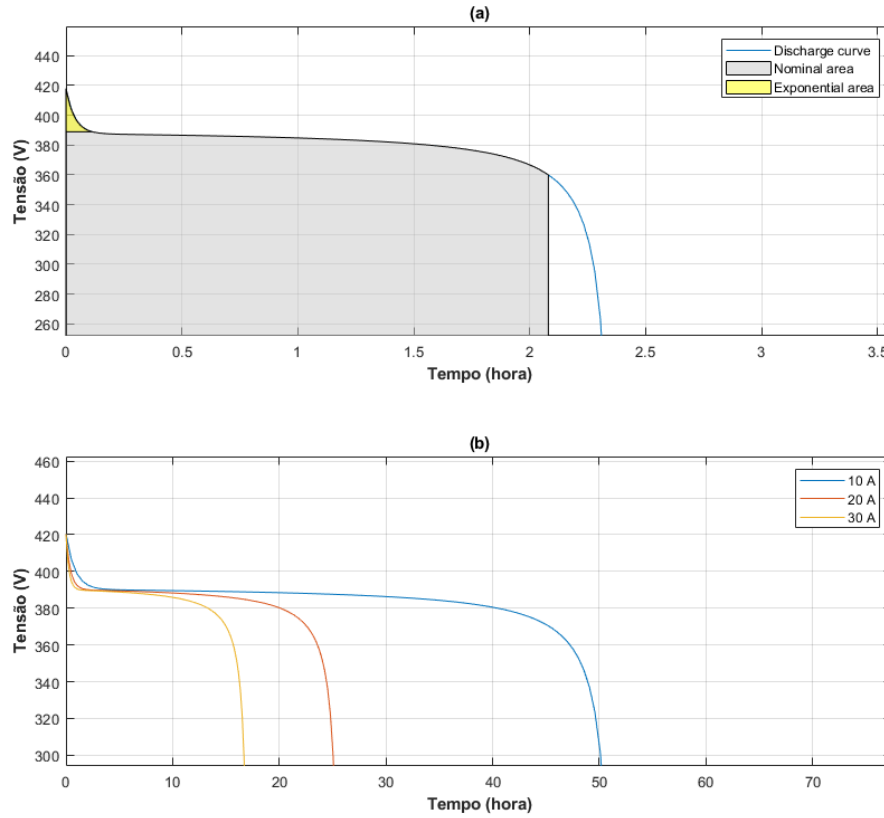
As características de carga e descarga da bateria apresentada na Figura 30 são exploradas sucintamente abaixo. O modelo do *Simulink* possibilita modificar os parâmetros do circuito para representar um tipo específico de bateria e suas características de descarga. A partir do equacionamento, foi possível analisar o comportamento da bateria para as condições de carga e descarga.

De forma geral, na descarga, para uma corrente constante, o cenário ideal da curva da tensão da bateria seria fixo em um valor até a descarga total, o que não ocorreu, conforme pode ser visualizado na Figura 95. A figura mostra as características típicas de descarga da bateria de íons de lítio. As características podem ser separadas em três áreas. A primeira área representa a queda de tensão exponencial quando a bateria é carregada. A largura da queda irá depender do tipo de bateria. A segunda área a carga que pode ser extraída da bateria até que a tensão caia abaixo da tensão nominal da bateria. Finalmente, a terceira área representa a descarga total da bateria, quando a tensão cai rapidamente.

Na primeira área, o valor máximo da tensão, correspondente a V_{max} , tem uma queda brusca até a tensão da região exponencial, seguido da área de operação nominal em que a tensão tende a diminuir com o aumento da resistência na célula. Quando a bateria estiver perto de descarregar totalmente, ocorre mais uma queda ao final da curva até a tensão de *cut-off* nas condições de descarga e a bateria cessa o processo. Ao retirar o dispositivo dos terminais da bateria, esta entra em uma zona de relaxamento, em que sua tensão se aproxima da V_{OC} , porém

sem alcançá-la devido à queda de tensão pela resistência e histerese (ANDREA, 2020). Em relação ao processo de carga, as baterias de Lítio podem ser carregadas a partir do algoritmo CCCV (*Constant Current, Constant Voltage*), em que sua tensão de saída será maior que a de circuito aberto por célula. Na literatura pode ser encontrado em (BUCHMANN, 2015) os estágios de carregamento.

Figura 95 – (a) Característica de descarga de corrente em 0.43478C (217.3913A). (b) $\varepsilon_0 = 390.3692, R = 0.0072, K = 0.0053941, A = 30.2313, B = 0.12212$.



Fonte: Próprio autor.

A curva de descarga da bateria, mostrada na linha azul da Figura 95 (a), uma característica não linear e é descrita pela Equação 48 - no modelo Shepherd (HAN et al., 2014), onde a corrente de carga é positiva ($i^* > 0$):

$$f_1(i_t, i^*, i) = \varepsilon_0 - K \frac{Q}{Q - i_t} \cdot i^* - K \frac{Q}{Q - i_t} \cdot i_t + A \cdot \exp(-B \cdot i_t) \quad (48)$$

onde:

- ε_0 : Tensão constante (V);
- K : Resistência de polarização (Ω);

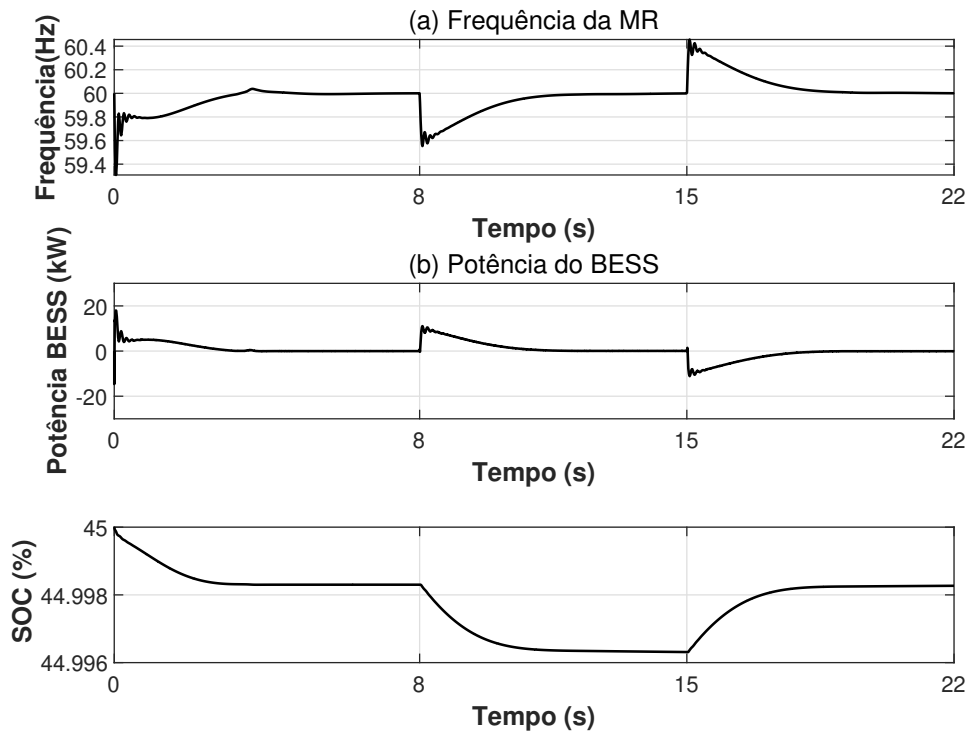
- i^* : Dinâmica da corrente de baixa frequência (A);
- i : Corrente da bateria (A);
- i_t : Capacidade extraída (Ah);
- Q : Capacidade máxima da bateria (Ah);
- A : Tensão exponencial (V);
- B : Capacidade exponencial (Ah^{-1}).

O segundo termo da Equação 48 é a polarização da tensão, explicitada como o produto da resistência de polarização e a corrente da bateria, que descreve o comportamento das baterias no estado descarga. Na Figura 95 (b) são apresentadas as curvas de descarga diante das mudanças em diferentes correntes.

A Figura 96 ilustra o comportamento do estado de carga da bateria (SoC) - iniciado em 45%, e através da figura é possível analisar a relação com a frequência e potência do BESS na MR. A Figura 96 (b) ilustra a potência ativa do BESS, a frequência do sistema Figura 96 (a) e o SoC Figura 96 (c), respectivamente.

De forma clara, no instante inicial, a bateria iniciou a descarrega com a ação do controle no BESS para trazer a frequência ao patamar estabelecido no momento do transitório inicial. Entretanto, foi possível verificar que o BESS manteve-se inoperante nessa região e o estado de carga foi constante. No segundo instante, em $t = 8s$, a carga 3 entrou no sistema e consequentemente o BESS operou para dar suporte ao controle da frequência, e ao entrar na região de estabilidade o BESS mais uma vez ficou inativo. Por fim, em $t = 15s$, a carga 3 saiu do sistema, com isso houve um aumento da frequência da MR e o BESS começou a absorver energia, assim dando início ao processo de carga, até que novamente a MR voltasse a ter a sua frequência estabilizada. Salienta-se que o BESS em conjunto com o gerador e o sistema fotovoltaico, deram suporte para estabilizar o balanço entre carga e geração.

Figura 96 – Análise do comportamento do SoC durante a simulação.



Fonte: Próprio autor.

Ao se tratar de SoC, vale destacar que para manter o estado de carga da bateria dentro de sua faixa de variação ideal, e por conseguinte, melhorar o desempenho, é importante o conhecimento do SoC para o gerenciamento da operação da bateria, pois em muitos sistemas cargas e descargas que levam o SoC a níveis extremos, podem causar danos irreversíveis a bateria que influencia diretamente a sua vida útil (PILLER; PERRIN; JOSSEN, 2001). Portanto, no caso apresentando na tese, a condição de restrição não foi estabelecida para o SoC, por duas razões: a que o tempo de atuação do BESS foi de curta duração e o estado inicial de carga considerou-se 45%.

6.1.1.6 Grandezas elétricas do VSC do sistema fotovoltaico

A Figura 25 apresentou o modelo utilizado na simulação e os respectivos resultados são apresentados a seguir. Geralmente, em sistemas FV o conversor utilizado é do tipo *buck-boost* de dois quadrantes, o mesmo utilizado no modelo BESS (Figura 32), porém como justificado na Seção 3.3.2, o controle MPPT não foi considerado atuando no controle, sendo apenas operando no ponto de máxima potência na condição definida de temperatura ($t = 25^{\circ}\text{C}$) e irradiação ($I = 750\text{W}/\text{m}^2$).

A simulação foi proposta utilizando o bloco "PV Array" do *Simulink* que foi definido um arranjo de módulos fotovoltaicos. Este constituído de *strings* de 11 módulos conectados em paralelo, cada *string* integrando 21 módulos em série. O bloco permite modelar módulos

fotovoltaicos predefinidos com base no modelo do sistema do *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) de 2018. O módulo escolhido possui as seguintes características:

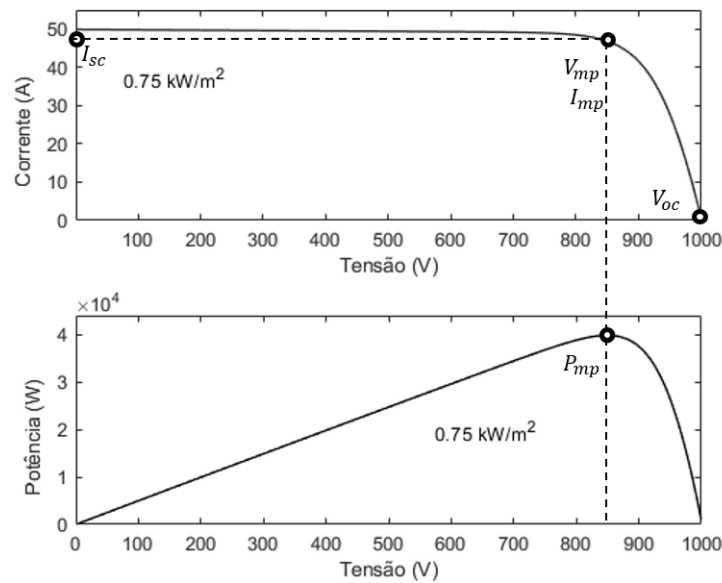
Tabela 25 – Características do módulo fotovoltaico.

Caracaterística	Valores
SunPower SPR-230E-WHT-D	-
Potência nominal P_m	230.04 Wp
Número de células(Ncell)	72
Tensão de circuito aberto (V_{oc})	48.2 V
Corrente de curto circuito (I_{sc})	6.05 A
Tensão de máxima potência (V_{mp})	40.5 V
Corrente de máxima potência (I_{mp})	5.68 A

Fonte: Próprio autor.

As curvas características ($I - V$) e ($P - V$), extraídas do arranjo, podem ser visualizadas na Figura 97, onde tem-se os valores da máxima potência fornecida corresponde ao ponto $P_{mp} = 39.82kW$ e $V_{mp} = 849.63V$.

Figura 97 – Curvas Características I-V e P-V.



Fonte: Próprio autor.

O link CC é modelado através de um capacitor, que tem por objetivo realizar o balanço de potência entre a potência gerada pelo sistema FV (P_{fv}) e a potência entregue pelo conversor CC/CA para a rede (P_{vsc}). A Equação que rege a dinâmica do link CC é descrita como:

$$\frac{d[V_{cc}^2(t)]}{d(t)} = \frac{P_{fv} - P_{vsc}}{C} \quad (49)$$

Adicionalmente, na Figura 25, observa-se que o controle de potência do conversor é realizado através dos blocos de controle da tensão V_{cc} do link CC e do controle de potência reativa Q (neste caso admitiu-se $Q^* = 0$), e que o VSC controlado por corrente opera no modo *grid-feeding* com fonte não despachável. O bloco modulador foi apresentado na Figura 21.

Como observado na Figura 98, a tensão V_{cc} sofre variações sempre que $P_{fv} \neq P_{vsc}$, gerando um pequeno desvio da tensão no link CC entre V_{cc} e sua referência V_{ccref} . Em decorrência do erro, o controle de tensão V_{cc} atua em P_{ref} do controle de corrente do VSC. Ao modificar a componente I_{ref} do VSC há uma variação na potência ativa P_o que o VSC injeta na MR e, consequentemente, a potência P_{vsc} que ele demanda no seu lado CC, assim o sistema atinge um novo ponto de equilíbrio no link CC, onde $P_{fv} = P_{vsc}$ e $V_{cc} = V_{ccref}$.

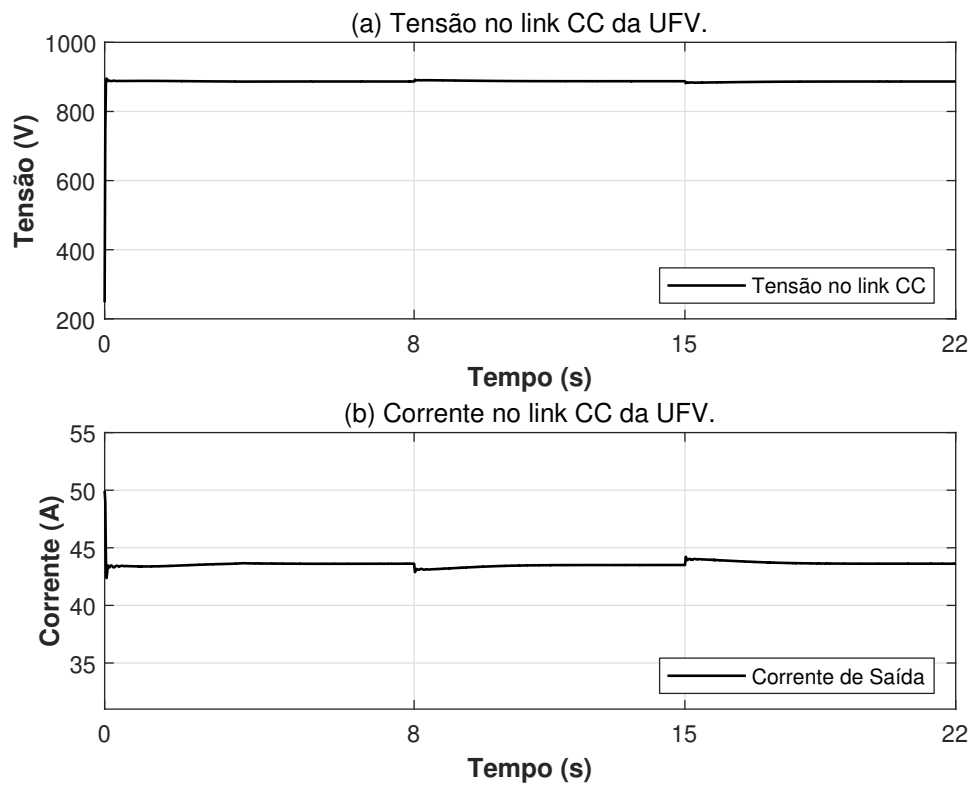
O bloco de controle da tensão (V_{cc}) é implementado considerando a variação de energia existente no capacitor do link CC devido a fonte de alimentação FV (intermitente). Analisando a Equação 50, observa-se que a planta de controle para V_{cc} é não linear, no entanto, é possível implementar o controle pela estimativa de energia, que utiliza indiretamente a tensão CC medida ao quadrado. Segundo (YAZDAMI; IRAVANI, 2010), a linearização da equação pode ser realizada em torno de um ponto operacional estacionário, obtido substituindo todas as derivadas por zero.

A equação define o controle da tensão do barramento CC, onde V_{cc} e V_{ccref} são as entradas do controle que geram um erro processado pelo compensador (PI) que define a potência de referência (P_{ref}) que será entrada do controle interno.

$$P_{ref} = Kp_{fv} \left(1 + \frac{1}{Tp_{fv} \cdot s} \right) \cdot (V_{ccref}^2 - V_{cc}^2) \quad (50)$$

em que, Kp_{fv} e Tp_{fv} são, respectivamente, o ganho e a constante de tempo do controlador PI do bloco de controle de tensão V_{cc} que controla indiretamente a potência ativa.

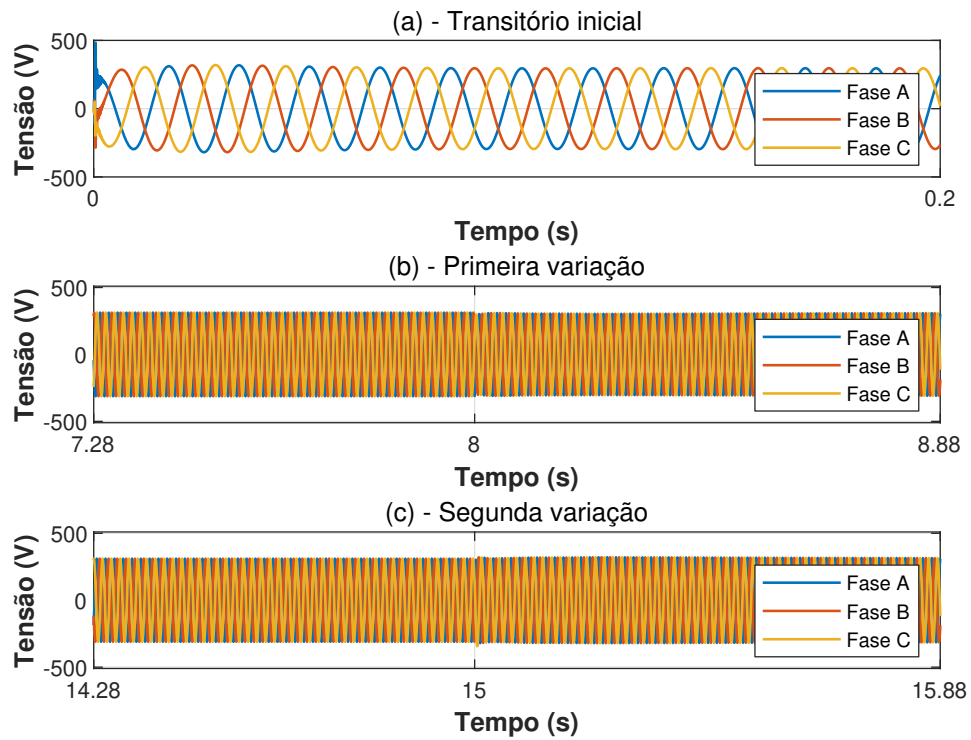
Figura 98 – Tensão do link CC da FV.



Fonte: Próprio autor.

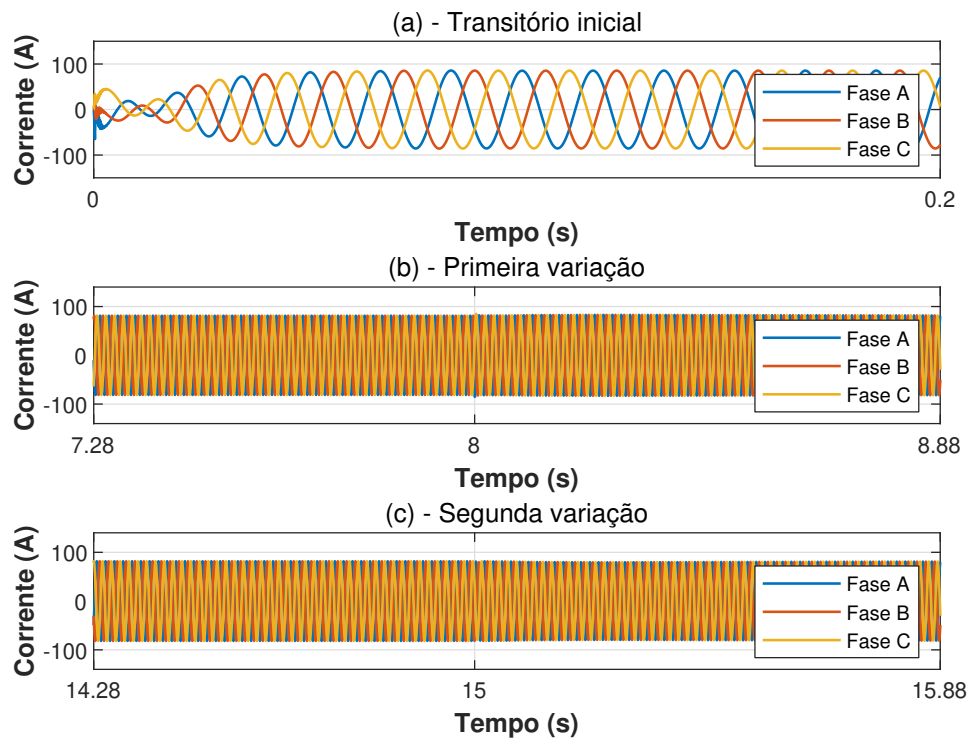
Os efeitos da variação de carga no terminal de saída do VSC, podem ser vistos nas Figura 99 e Figura 100. As tensões trifásicas têm uma pequena alteração de amplitude nas fases *a*, *b*, *c*. Já para corrente trifásica, percebe-se que há também distúrbio de forma suave, mas as correntes e tensões tendem estabilizar no momento seguinte logo após a variação.

Figura 99 – Tensão CA na saída do VSC na UFV.



Fonte: Próprio autor.

Figura 100 – Corrente CA na saída do VSC na UFV.



Fonte: Próprio autor.

6.1.2 Cenário 2 - Microrrede operando com variação da geração fotovoltaica e diminuição de carga

Neste cenário, considerou iniciar em modo ilhado e realizar a variação da irradiação, consequentemente a potência da geração solar; além do seccionamento (abertura) do disjuntor da Carga 3 da MR apresentada na Figura 52. As variações da irradiação solar foram definidas de acordo com a Tabela 26 para operação no ponto de máxima potência na condição de temperatura ($t = 25^{\circ}\text{C}$).

Tabela 26 – Irradiação ao longo do tempo no Cenário 2.

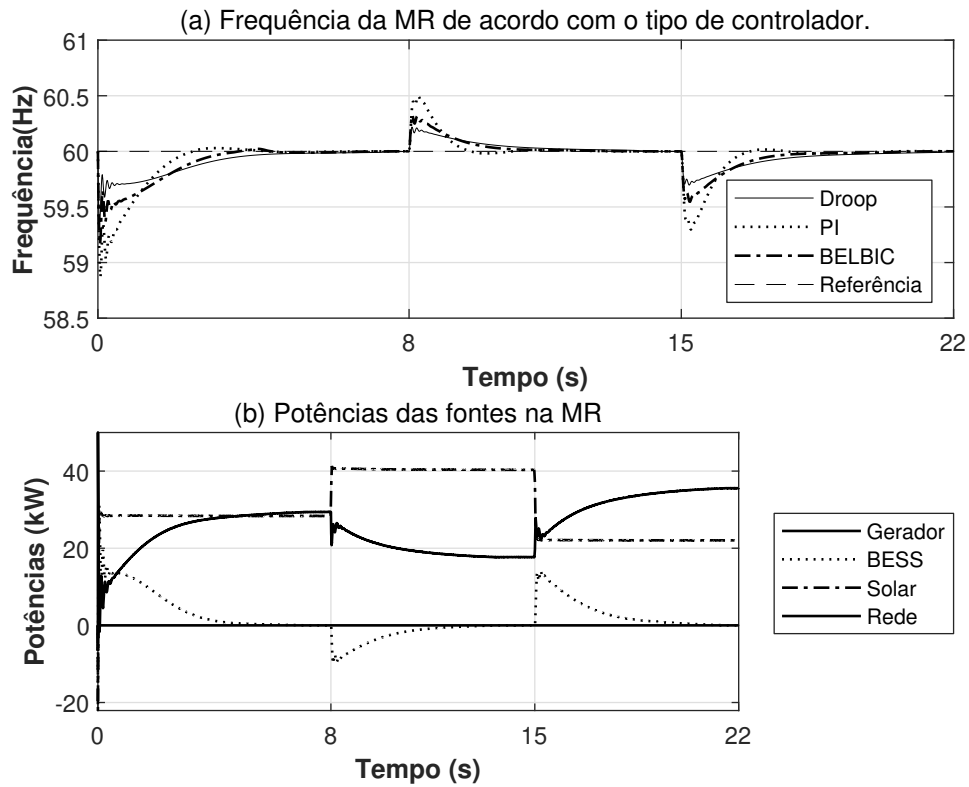
Irradiação (W/m^2)	Tempo (s)	Potência (kW)
550	0	28
850	8	42
450	15	22

Controle *Droop*

O objetivo foi atender as cargas e estabilizar a frequência no valor desejado. Neste controle proposto na Seção 5.2, a Figura 101 (a) mostra que em todas as variações de geração solar, o controle atuou de forma efetiva garantindo os critérios definidos nas Tabelas 6 e 7.

Ao analisar a Figura 101, no primeiro patamar (transitório inicial até $t = 8\text{s}$), observou-se na Figura 101(b) o BESS injetou rapidamente uma grande quantidade de potência, que proporcionou estabilizar a frequência não apenas com a contribuição do BESS, e sim com a parcela da geração FV e do gerador à Diesel operando para atender as cargas e estabilizar a frequência. No segundo instante de tempo ($t = 8\text{s}$ e $t = 15\text{s}$), a geração fotovoltaica tem um aumento, consequentemente o gerador imprime uma menor potência e no balanço de geração-carga. O controle do BESS identificou que houve um excesso de geração FV que já supriria a demanda e com isso o excedente foi armazenado na bateria até atingir o equilíbrio. No último *step* de variação FV, em decorrência da diminuição da FV, o gerador e a BESS disponibilizaram potência para mais uma vez impor as condições desejadas.

Figura 101 – Comportamento das potências da MR utilizando o controle droop.

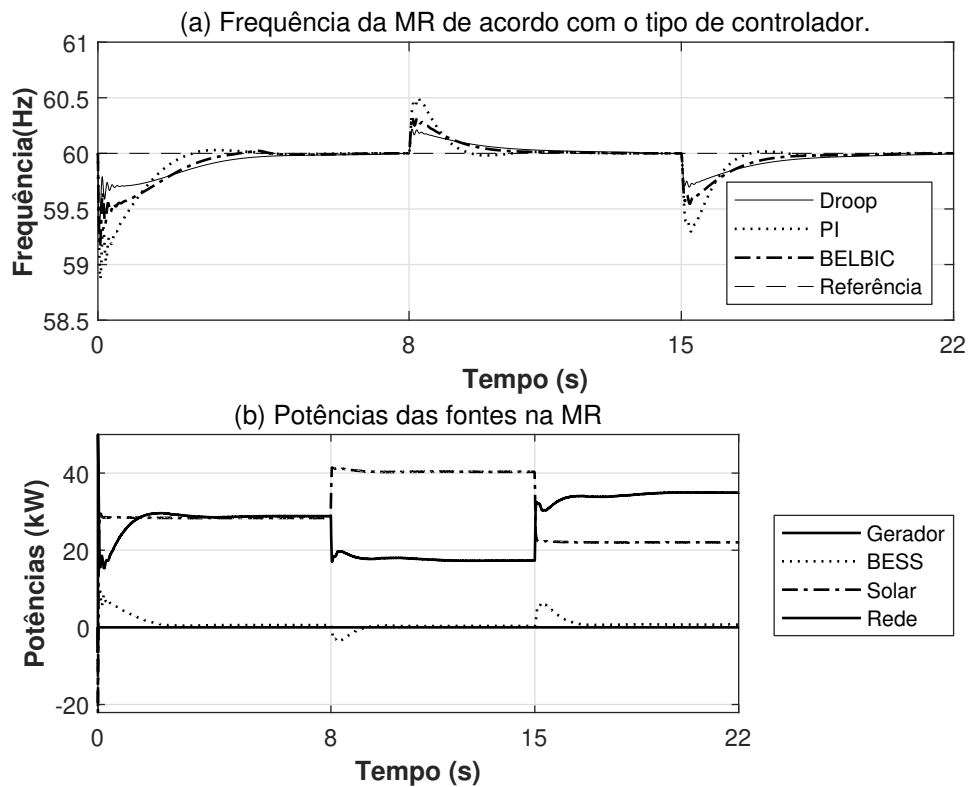


Fonte: Próprio autor.

Controle PI

O objetivo do controle PI foi o mesmo proposto no *controle droop*, porém comportando-se como controle primário e secundário - como explicitado na Seção 5.4. A Figura 102 (b) mostra a influência das variações de geração solar na potência injetada na MR, e o controle atuou na Figura 102 (a), entretanto é observado que os critérios definidos nas Tabelas 6 e 7 foram violados.

Figura 102 – Comportamento das potências da MR utilizando o controle PI.



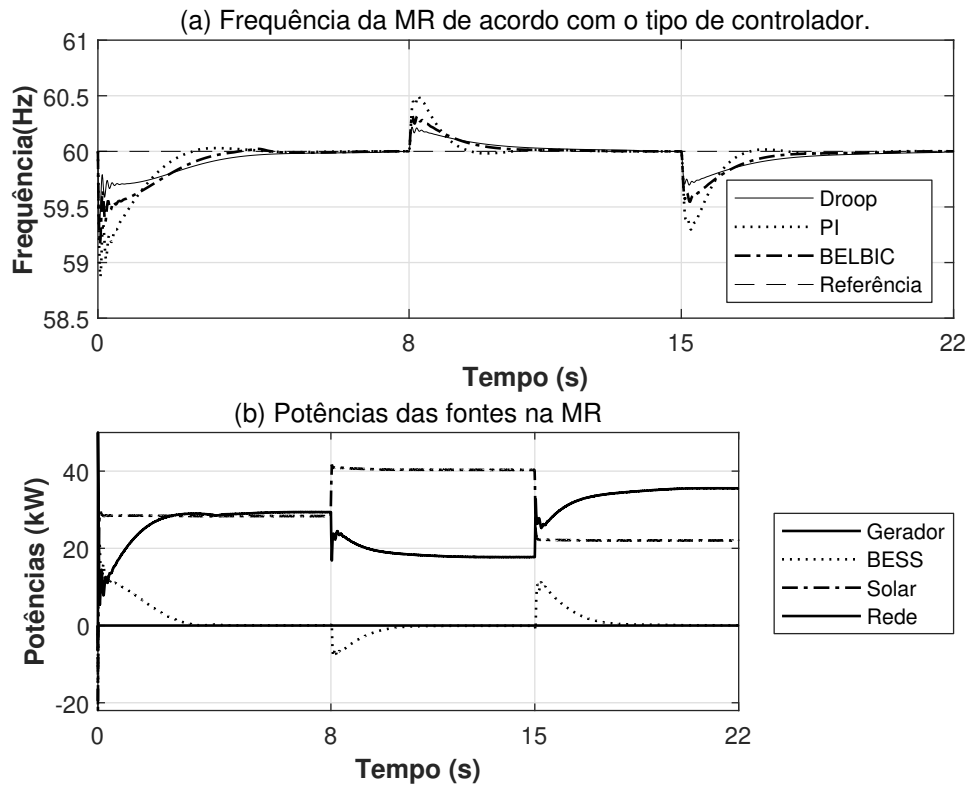
Fonte: Próprio autor.

Nos instantes no qual houveram transitórios de geração solar, o BESS entrou em operação com potência insuficiente para atender os critérios de frequência respeitando os transitórios. Outro ponto em destaque foi o controlador PI geralmente manteve erros em regime permanente, comprovados na figura; e o tempo de resposta do controle, neste caso, não foi suficiente. Como o controlador não atendeu aos critérios, a análise foi realizada de forma sucinta.

Controle BELBIC

O controle proposta nessa tese, chamado de controlador BELBIC, foi modelo e apresentado detalhadamente na Seção 5.5. A Figura 103 (b) mostra a influência das variações de geração solar na potência injetada na MR. Já a Figura 103 (a), expõe os resultados obtido ao longo da simulação, e assim como o *droop*, o BELBIC atendeu os critérios definidos nas Tabelas 6 e 7.

Figura 103 – Comportamento das potências da MR utilizando o controle BELBIC.



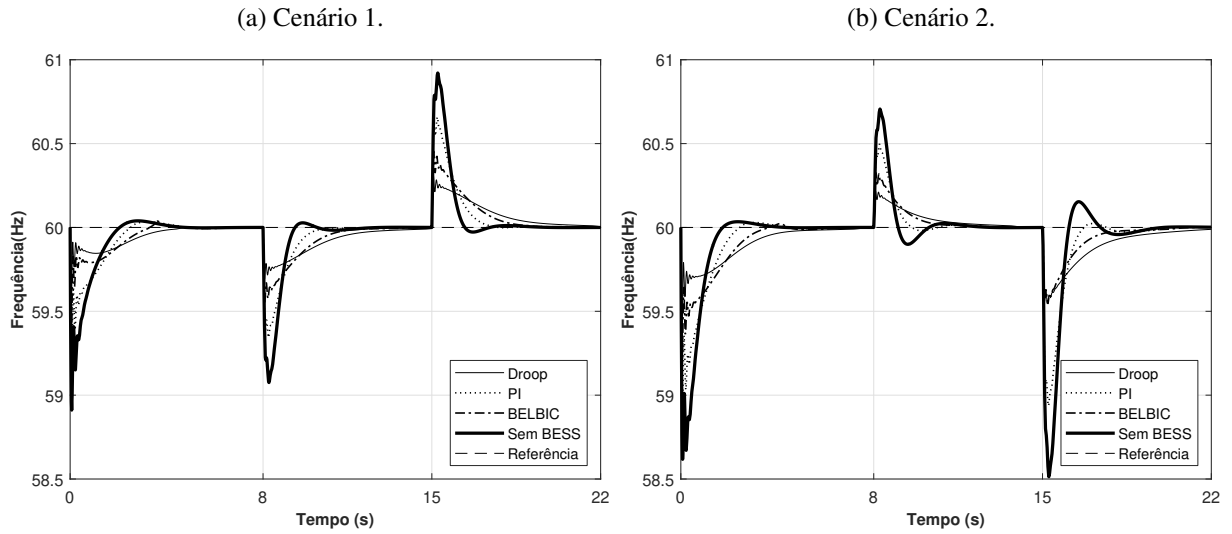
Fonte: Próprio autor.

O comportamento entre o *droop*, como controle primário, e o BELBIC, como controle primário e secundário, foi analisado de forma independente, porém em detalhe comparativo apresentou erro em regime permanente. Na Figura 101 (a) observa-se um erro em regime - comumente encontrado em controle primário. Já a Figura 103 (a) verificou uma melhoria significativa no desempenho no controle da frequência, utilizando o controlador BELBIC comparado ao *droop*, nas ocorrências de mudanças nos pontos de operação da MR. A estratégia, diferentemente das anteriores, apresentou como principal vantagem erro nulo em regime permanente e uma resposta mais rápida e menor tempo de acomodação comparado aos outros casos. As afirmações serão discutidas na Seção 6.1.3 analisando o estado de carga da bateria com base na Figura 106.

6.1.3 Análise prescritiva dos cenários 1 e o cenário 2.

As Figuras 104, trazem os comportamentos das frequências nos dois cenários propostos. Na comparação, percebeu que em ambos os casos os controladores *droop* e BELBIC foram capazes de estabilizar a frequência, respeitando os limites nas condições de operação normais, em regime permanente e na ocorrência de distúrbios. Portanto, a MR garantiu que a frequência retorne para a faixa de operação, permitindo a recuperação do equilíbrio carga-geração.

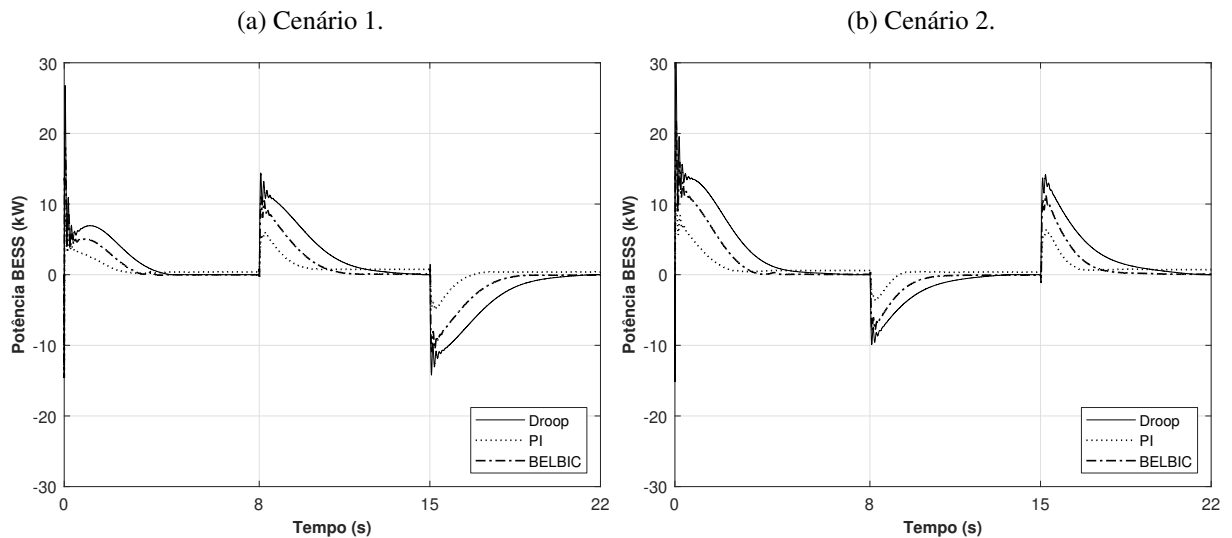
Figura 104 – Comparativo dos controles da frequência da MR.



Fonte: Próprio autor.

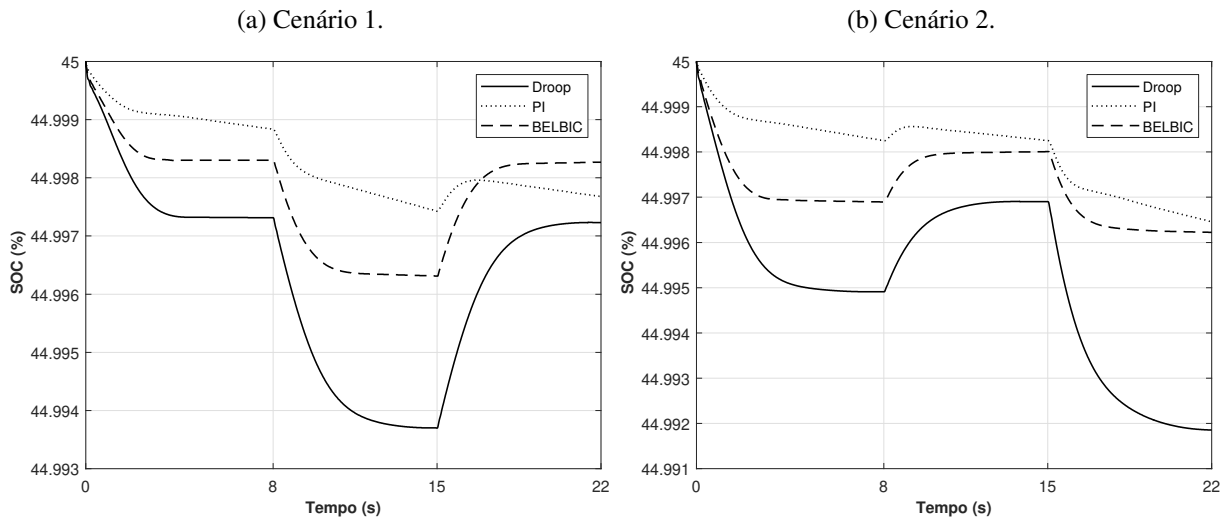
Numa avaliação da correlação entre as Figuras 105 e 106, notou-se que o estado da bateria foi definido através do sinal de P_{bess} , que é a potência entregue pelo sistema de armazenamento em baterias. Quando $P_{bess} > 0$, a bateria está injetando potência na MR e consequentemente descarregando. No caso no qual o $P_{bess} < 0$, o SAE opera como carga para o sistema (o sinal negativo indica que está consumindo potência da rede) e então, é carregada. O SoC inicia em 45%, o que significa que a bateria está inicialmente carregada com 45% da sua capacidade.

Figura 105 – Comparativo entre as potências do BESS.



Fonte: Próprio autor.

Figura 106 – Comparativo do estado de carga do BESS.



Fonte: Próprio autor.

Uma evidência vista na Figura 106 está relacionada ao desempenho do SAE na ação de controle BELBIC quando comparado ao *droop*. Mesmo observando o PI que obteve um menor consumo das baterias, o controlador PI foi descartado devido as justificativas anteriores, portanto ficará eliminado da análise do SOC.

De fato, diferente dos demais, o BELBIC mostrou-se um controle eficaz para controle de frequência e a eficiência está relacionada não apenas por garantir a estabilidade, e sim, adicionalmente o aproveitamento do SAE; e com isso não comprometendo a vida útil das células das baterias. O motivo do comportamento, claramente é observado diante do erro em regime permanente, que ocasiona uma operação contínua do BESS. A monitoração contínua do SoC garante que o carregamento do BESS não atinja limites capazes de prejudicar a sua vida útil. Adiante serão apresentados de forma sucinta os pontos que consolidam esta informação.

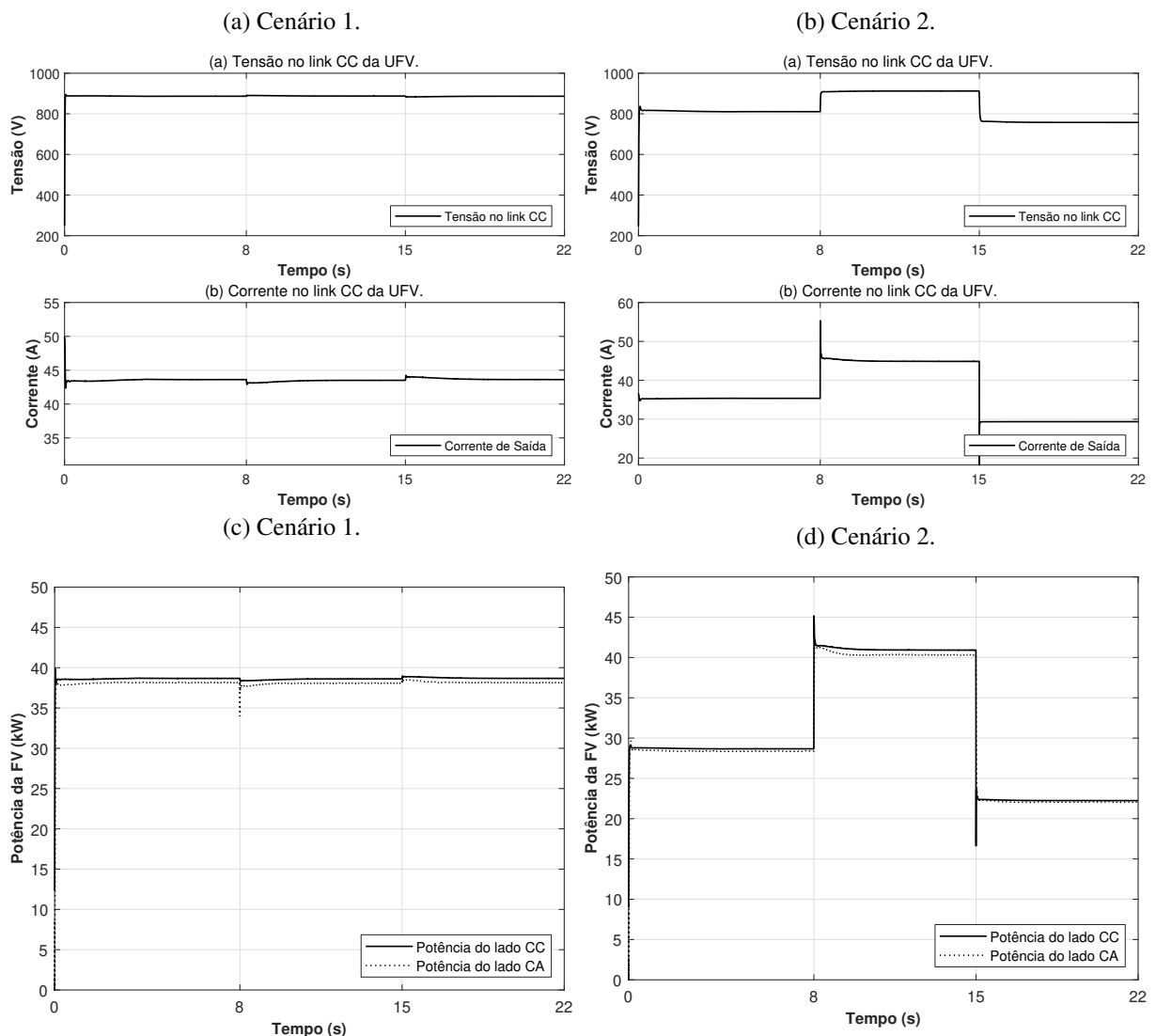
É de grande valia, em aplicações que envolvem sistemas de armazenamento de energia em baterias, monitorar os parâmetros internos da bateria para garantir uma operação segura. O não monitoramento deles pode comprometer a performance e à vida útil da bateria e, em casos extremos, causar danos mais sérios, como explosões (CHEN et al., 2017).

Tendo em vista a segurança, as baterias são lacradas e os parâmetros não podem ser acessados, a alternativa que resta é realizar estimativas, sendo o estado de carga um dos indicadores de extrema importância, que compara a capacidade atual da bateria (em porcentagem ou em valor p.u.) com a sua capacidade máxima. Em termos de valores, quando a bateria está totalmente descarregada, o SoC é igual a zero (0%) e em carga total (100%).

Por fim, com base na escolha do BELBIC como o controlador que obteve a melhor resposta, uma breve exploração dos resultados dos comportamentos serão apresentados: correntes, tensões e potências dos lados CC e do lado CA do BESS e da usina fotovoltaica (UFV).

Ao analisar a Figura 107 (c) e (d), é demonstrado a transferência de potência do lado CC para o lado CA. A Figura 107 (d) mostra o comportamento da potência quando ocorreu uma variação da incidência solar nos painéis fotovoltaicos com base na Tabela 26. Nota-se que um degrau de incidência solar no instante ($t = 8s$) fez a potência elevar para $P_{FV} = 42kW$, superior a potência anterior; posteriormente, no instante ($t = 15s$), um degrau de incidência solar inferior ao anterior, também causou influência na potência de saída diminuindo para o valor de $P_{FV} = 22kW$. Percebe-se, então, que a potência gerada pelo sistema varia linearmente com a incidência sobre os painéis fotovoltaicos.

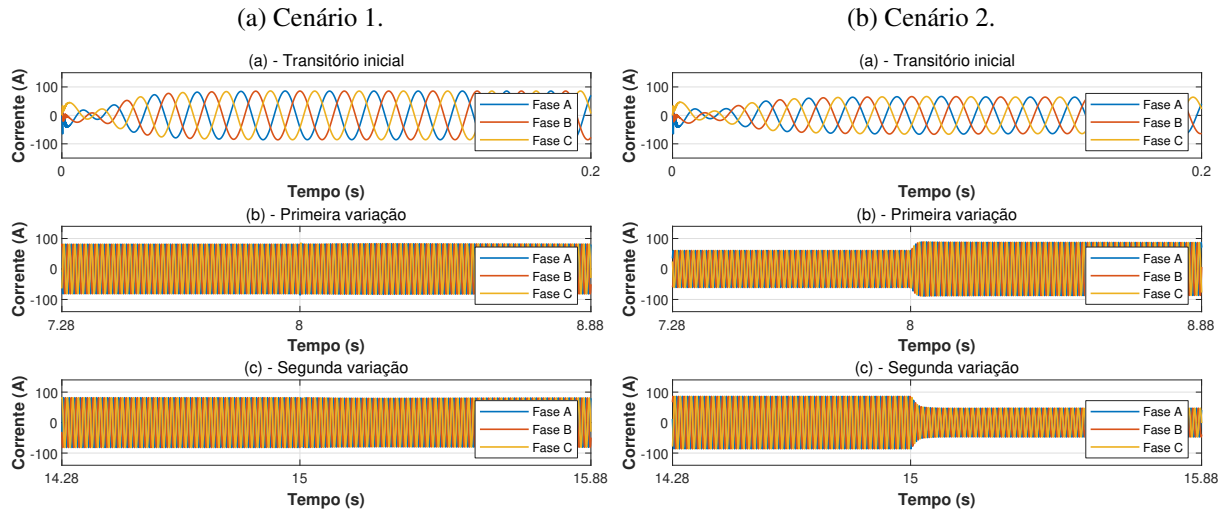
Figura 107 – Tensão do link CC da FV.



Fonte: Próprio autor.

Claramente é observado através das Figuras 108 (a) e (b), que a saída do conversor do sistema fotovoltaico possui corrente com amplitude correspondente a apresentada nas Figuras 107 (c) e (d). Nota-se também que rapidamente os controles descritos na Seção 3.3.2 atuam.

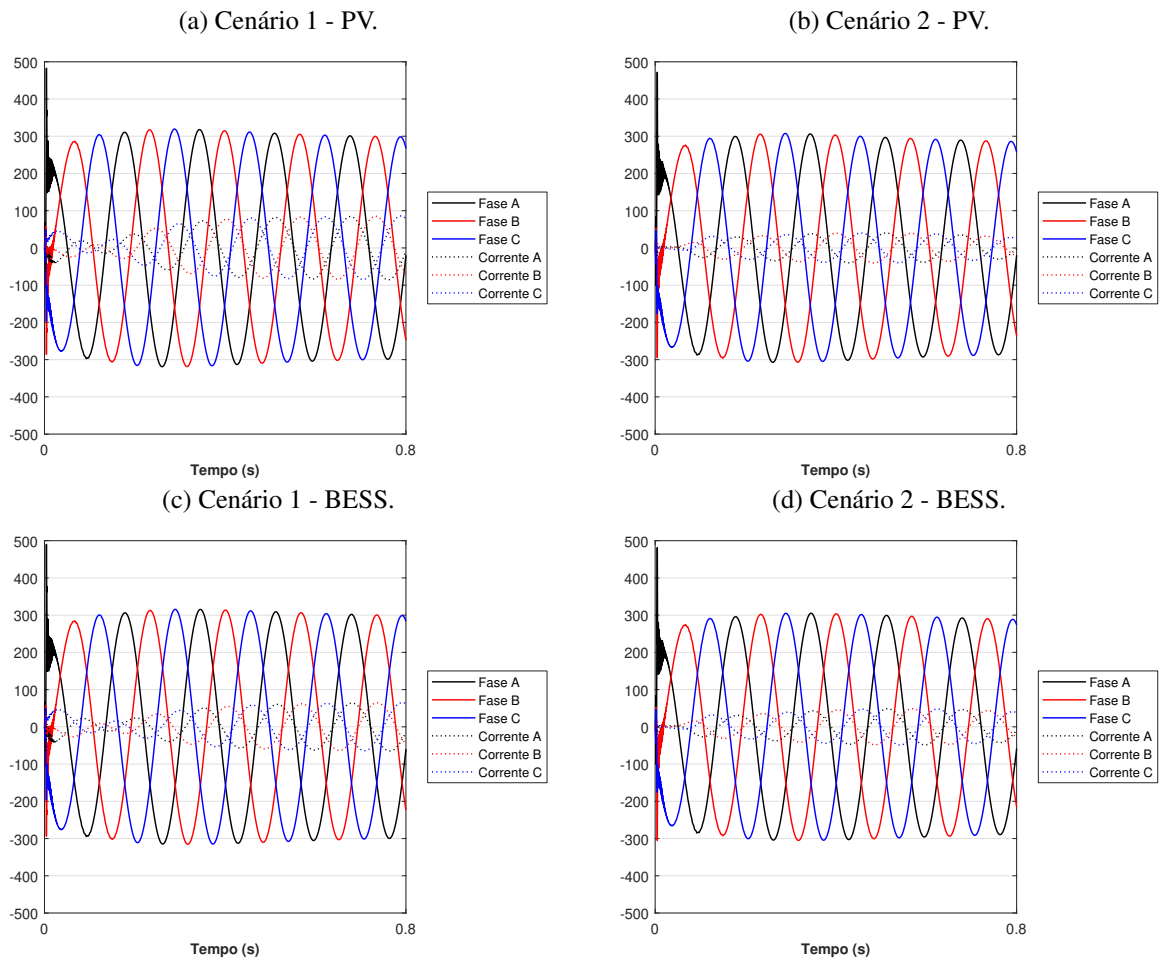
Figura 108 – Corrente CA na saída do VSC da UFV.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 109, mostra em detalhes todas as correntes geradas em fase com a tensão da MR para os dois cenários proposto.

Figura 109 – Corrente de saída do VSC em fase com a tensão da MR.



Fonte: Próprio autor.

6.2 Conclusão

O capítulo retratou a implementação dos controladores aplicados em ambiente computacional e aos cenários da microrrede. Como não havia uma técnica para o ajuste dos parâmetros do BELBIC, a utilização do PSO nesses ajustes facilitaram bastante para se obter um ponto de partida referente aos valores dos parâmetros, ou seja, uma referência inicial desses valores para serem aplicados aos controladores BELBIC. Posteriormente, ao longo das otimizações, foram se restringindo cada vez mais a região de busca do PSO. A técnica utilizada se mostrou capaz de ajustar os parâmetros do controlador BELBIC e PI, sem maiores problemas.

Os estudos descritos na tese mostraram que na elaboração desse controlador, os próprios autores do controlador não abordaram nenhuma técnica para ajuste dos parâmetros, apenas descreveram que o ajuste era realizado de forma empírica.

Por fim, os objetivos desejados foram alcançados após a implementação do controlador BELBIC como uma alternativa robusta, rápida e eficiente; ao se propor esse controlador em controle de frequência utilizando sistema de armazenamento em baterias. As simulações juntamente com os resultados comprovaram que o controlador se mostrou capaz de ser aplicado a esse sistema e possivelmente a outros com resultados satisfatórios.

7 CONCLUSÃO

O trabalho apresentou o conceito e características, assim como aspectos da operação e controle das MRs. O controle hierárquico de MRs foi aplicado como método de controle, sendo abordados, para esse estudo, os controles primário por meio do método de *droop* e como controles primários e secundários PI e BELBIC.

Outras questões no âmbito da operação de MRs no modo ilhado foram apresentadas no decorrer do levantamento bibliográfico. Ao considerar as MRs, estas possibilitam maior confiabilidade e qualidade de fornecimento de energia aos seus consumidores, uma vez que proporciona a alternativa de operar ilhada dispondo da capacidade de manter o fornecimento de energia às cargas durante desligamentos ou ocorrência de falhas no sistema elétrico principal. Além disso, as MR possuem alta capacidade de controlabilidade e simplificação, que são extremamente importantes para o sistema elétrico. Essa alternativa irá possibilitar inúmeras cargas e RED a serem vistas pelo sistema como exclusivamente um ponto de consumo ou fornecimento de energia, e também representando um sistema que dispõe receber comandos de controle e atender às necessidades do sistema elétrico.

Para atendimento de todos os objetivos elucidados, é fundamental que as MRs disponham de arquiteturas de controle que, embora sejam fortemente embasadas em diversos conceitos do controle do SEP e de máquinas rotativa elétricas de grande porte, sejam projetadas para atender aos requisitos específicos das MRs. O conceito de controle hierárquico claramente apresenta-se fundamental e adequado aos propósitos, uma vez que englobam desde o controle local das grandezas físicas dos RED ao controle entre o sistema elétrico e as MRs. Também no nível mais alto considerando-se inclusive os aspectos econômicos e de mercado envolvidos. Dentro da hierarquia, o controle primário assume um papel central dentro dos objetivos a serem alcançados pela MR, visto que ele é o responsável por estabilizar a operação ilhada da MR e permitir a operação em paralelo de diversos RED, como descritos em trabalhos apresentados ao longo da Seção 2.10.1. Como elemento de controle base dessa tese, o controle primário foi definido e caracterizado através do método *droop*. O método *droop* foi apresentado e, a fim de superar algumas de suas desvantagens, foi proposto o controlador BELBIC. Outras alternativas em trabalhos encontrados na literatura e citados na tese, introduzem a utilização da impedância virtual junto ao controle *droop*. Assim, o controle primário através do método *droop* foi parte fundamental dos modelos definidos no Capítulo 5, os quais serão utilizados para as simulações e resultados deste trabalho.

Com o objetivo de estudar as normas existentes referentes à conexão de microrredes nacionais e internacionais, nesta trabalho foram apresentados os aspectos relevantes associados a integração das tecnologias e recursos energéticos presentes em MRs aos sistemas elétricos

convencionais. Assim, uma ampla revisão bibliográfica foi apresentada. As normas e padrões referentes a conexão de geração distribuída também foram consideradas, em razão de, dentro da MR, prevalece o uso desse tipo de geração.

Brevemente foi citado os Procedimentos de Rede do ONS, com o intuito de despertar possibilidade de possíveis considerações para conexão de microrredes em subestações de fronteira da rede básica de transmissão. Embora atualmente seja uma possibilidade pouco provável ou mesmo inviável, do ponto de vista técnico-econômico, as perspectivas podem vir a ser reavaliadas com a disrupção dos RED. De fato, diante de possibilidades futuras, há possibilidade que a própria rede de distribuição (rede de média tensão) poderá ser considerada um aglomerado de microrredes. Entretanto, o objetivo da tese não foi levantar as hipótese, e sim trazer ao leitor de forma sucinta os requisitos de conexão conforme o PRODIST. Os documentos do PRODIST, principalmente o documento que normatiza o acesso ao sistema elétrico que operam em nível de tensão inferior a 230 kV, descrevem diversos aspectos técnicos apontados como relevantes no empreendimentos com conexão direta à rede de distribuição. Os pontos mais importantes foram elencados nesta tese para fins de consultas futuras.

Após as análises das normas, não foram encontradas normas nacionais específicas para microrredes ou redes inteligentes. Portanto, a implantação dos recursos depende de interpretações de normas dos respectivos segmentos, a exemplo, para os RED existem normas referentes à geração distribuída, etc. Desta forma, na ausência de normativas, o critério estabelecido fica mediante a concessionária criar seu próprio conjunto de regras referentes a conexão e operação das MRs dentro de sua área de concessão, considerando os requisitos gerais definidos no PRODIST e nos Procedimentos de Rede do ONS. Por outra perspectiva, as normas internacionais apresentam especificações mais claras referentes a conexão e operação de microrredes conectadas no sistema de distribuição, tornado assim um balizador, visto que poderão ser consultadas nos assuntos referentes a conexão e operação (do mesmo modo que planejamento e padrões de comunicação). Ficando assim as Seções 2.3, 2.4, 2.5, 2.6, 2.7.1, resumos que poderão ser utilizados como consultas de informações para conexão de microrredes.

Anteriormente a elaboração da estrutura da MR e realização das simulações, foram necessários para estudar o tema proposto, desenvolver e aprimorar modelos dos RED. Durante esta fase, mais especificamente no capítulo 3, percebeu-se que os modelos apresentados exigiam analisar os conceitos do temas como: sistemas de conversão de potência CC/CA, sistemas de controle, recursos energéticos e estratégias de modos operação. Os temas citados são bastante diversificados na literatura, assim, foram descritos, referenciados e analisados.

Neste trabalho os principais tópicos necessários para desenvolvimento dos modelos RED, destaca-se os modelos do sistema de armazenamento em baterias e o sistema fotovoltaico. Sendo detalhado a modelagem da conversão CC/CC, fonte primária de energia (bateria e módulos fotovoltaicos), os respectivos sistemas de controle associados e a dinâmica do link CC. Além disso, foi necessário descrever a integração dos controles do lado CC com o lado CA utilizando

o VSC, trazendo os modelos propostos para aplicações envolvendo os modelos operativos entre as fontes despacháveis e não despacháveis.

Em decorrência do controle de corrente ser implementado no referencial estacionário $\alpha\beta$ ou no referencial síncrono dq . A escolha pelo referencial $\alpha\beta$ no controle é realizado com base em dois sistemas (sistema de coordenadas ab) onde é possível controlar separadamente as potências ativa e reativa, além de não necessitar de um sistema de sincronização quando comparado ao controle do referencial dq . O controlador PI usualmente é empregado nas estratégias de controle interno para inversores trifásicos conectados à MR, devido a sua simplicidade, popularidade, baixo esforço computacional; porém, também outro controlador bastante utilizado e que substitui o controlador PI é o compensador Proporcional-Ressonante (PR), por apresentar bom desempenho para o controle de grandezas senoidais - descritos na Seção 3.2.4.

A tese propôs um controlador baseado num método inteligente baseado no aprendizado emocional do cérebro para melhorar o desempenho de controle de frequência da microrrede. Esse controlador possui uma característica peculiar, por apresentar vários parâmetros que dão a liberdade para escolher o conjunto de valores mais adequados à resposta (MOHAMMDI-MILASI; LUCAS; NAJAR-ARRABI, 2004). Sendo assim, o torna um controlador atrativo para aplicações na área de sistemas de controle por sua flexibilidade. No caso do ajuste desses parâmetros, os autores não abordam uma forma para ajustá-los, mas nessa tese utilizou-se o método PSO que foi responsável por esse ajuste. A aplicação desse método possibilitou encontrar um conjunto de valores desses parâmetros, de acordo com a resposta que se propusera. Como foi possível observar no transcorrer deste trabalho, o controlador BELBIC aplicado em MR, surge como uma alternativa capaz de atingir resultados satisfatórios no controle desvio da frequência utilizando BESS.

Os resultados alcançados serviram como base para estudos comparativos utilizando-se outros controladores já descritos ao longo da tese. No modo ilhado, foram avaliados dois cenários em condições de variação de carga e geração fotovoltaica, que provocaram perturbações no sistema ocasionando estabilidade de frequência da MR. Assim, os cenários avaliaram a utilização de sistemas de armazenamento de energia em baterias para melhoria das condições de estabilidade. Estes resultados comprovaram que o controlador BELBIC foi capaz de estabilizar a frequência rapidamente após as condições de variações impostas, o que necessitou uma a operação rápida e efetiva em conjunto com outras fontes. Diferentemente do controle *droop* que obteve operação contínua dos BESS em regime permanente, verificando sua resposta à comandos de variação de potência ativa à perturbações de carga e geração. Os resultados comparativos são evidenciados e explorados na Seção 6.1.3.

7.1 Trabalhos futuros

O trabalho apresentou amplas possibilidades para o desenvolvimento de futuras pesquisas aplicadas as técnicas de controles inteligentes em microrredes relacionados aos níveis

hierárquicos. Por outro lado, questão referente à possibilidade de aprimorar-se os controladores baseados em sistemas de inteligência artificial também podem ser exploradas.

No caso do controlador inteligente baseado no aprendizado emocional do cérebro, observou-se que durante o desenvolvimento da tese há diversas abordagens a partir do uso de diferentes técnicas de inteligência artificial, com isso podem ser utilizadas em trabalhos futuros. Visto que o modelo de aprendizado do BELBIC foi apresentado de forma simplificada em diversos níveis, (LUCAS; SHAHMIRZADI; SHEIKHOLESAMI, 2004) equações adicionais podem ser formuladas para representar o tálamo, hipocampo, hipotálamo, entre outros (MOREN; BALKENIUS, 2000; ÖHMAN; MINEKA, 2001). Ademais, pode-se fazer uso do modelo BELBIC associado a técnicas distintas de controle, possibilitando novas modelagens híbridas para este tipo de controlador. Além de possibilitar outras formas de ajustes dos parâmetros.

A metodologia proposta do trabalho ficou restrita ao uso BELBIC como controle único, porém uma nova forma de aplicá-lo seria utilizando o BELBIC em conjunto com controle *droop*, sendo este atuando como controle secundário concatenado com o *droop*. A motivação disto está relacionada a razões da capacidade do aprendizado do controlador inteligente, tornando-se uma abordagem promissora para lidar com a dinâmica não linear da microrrede sem aumentar a complexidade do controlador, e manter a estabilidade da frequência e tensão usando técnicas de eficientes de rastreamento da referência desejada. O desempenho do sistema inteligente proposto, como controlador secundário, pode ser avaliado em termos do erro absoluto de frequência e tensão na microrrede. Propondo assim um controlador eficiente e robustez sob as condições de falha e diferentes incertezas do sistema em comparação com outros controladores.

A partir da modelagem da MR utilizada no trabalho, outros métodos do ajuste dos parâmetros do controlador implementado não se fez possível diante do elevado tempo de simulação, devido principalmente a questões da forma que o *Matlab/Simulink* realiza suas integrações numéricas ao longo das simulações. Por esta razão, pode-se optar em futuros trabalhos na utilização de outros hardwares ou software com maior capacidade de processamento ou até mesmo forma estruturada diferente da apresentada no *Matlab*. Neste caso, seria possível realizar treinamentos dos estímulos do controlador proposto de forma online, realizando assim um ajuste fino do controlador em questão, utilizando técnicas de aprendizado por reforço.

Por outro lado, a utilização do *Matlab/Simulink* proporcionou uma gama de possibilidades devido a alto poder de flexibilidade da ferramenta. Entretanto, há diversas oportunidades de estudos dentro da temática de MRs.

Adicionalmente as alternativas, têm-se também as propostas para a continuidade do trabalho desenvolvido, que são elas:

- Implementar experimentalmente o trabalho no Typhoon HIL (*Hardware In the Loop*) no Laboratório de Armazenamento e Mobilidade (LAM) ou até mesmo tentativa de adequação da proposta aplicada a microrrede real no LAM;

- Incorporar na metodologia de corte de carga ou corte de geração por sub-frequência para impedir a violação dos requisitos mínimos de qualidade requeridos pelo ONS;
- Analisar os transitórios de tensão que podem ocorrer nos ilhamentos de microrredes;
- Verificar a influência dos coeficientes de inclinação do controle primário na dinâmica do controle secundário;
- Aperfeiçoar a estratégia proposta do ajuste do controlador no intuito de compensar a região de busca, além de propor funções objetivo distintas atribuindo outras variações;
- Propor a utilização de algoritmos baseados em aprendizado por reforço, associados aos recentes avanços na área do aprendizado profundo das redes neurais, tendo por objetivo a elaboração de novas arquiteturas que permitam a este controlador atingir uma maior generalização em sua aplicação;
- Conexão da MR à rede elétrica com implementação do controle terciário e sistema para sincronismo e detecção de ilhamento;
- Efetuar um estudo adequado para definição dos valores ótimos dos parâmetros para o sistema de controle dos inversores eletrônicos que garantem o melhor comportamento de estabilidade para várias condições operacionais;
- Avaliar cenários na qual a MR atinja valores muito superiores aos da capacidade de geração despachável durante a ocorrência de falhas de comunicação e controle;
- Analisar a distribuição de potências ativa e reativa não somente dependente da capacidade nominal das unidades geradoras, mas também considerando critérios variáveis, como por exemplo o estado de carga das baterias e critérios econômicos.

Em síntese, diversos são os desafios e oportunidades referentes aos temas de técnicas de controles inteligentes em microrredes relacionados ao controle de frequência e tensão. Devido as constantes mudanças e avanços nas técnicas de controladores inteligentes, bem como nos modelos de sistemas de inteligência artificial, permitindo assim cada vez mais obter melhores desempenhos e, por consequência, implicando desafios cada vez mais complexos.

7.2 Trabalhos publicados

- AQUINO, RONALDO R. B. ; CORDEIRO, LUIZ F. A. ; MARQUES, DAVIDSON C. ; SILVA, JEYDSON L. ; BANDEIRA, CAMILA M. ; ANDRADE, ANDRE L. M. M. . An emotional controller PLC implementation for an industrial fan system. In: 2016 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN), 2016, Vancouver. 2016 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN), 2016. p. 3889.

- SILVA, JEYDSON L.; MARQUES, DAVIDSON C. ; AQUINO, RONALDO R. B. ; NOBREGA NETO, O. . A PLC-based Fuzzy Logic Control with Metaheuristic Tuning. *Studies in Informatics and Control*, v. 28, p. 265-278, 2019.
- TABOSA, P. ; ROSAS, P. A. C. ; MARQUES, D. C. ; AQUINO, R. R. B. ; LEITE, J. H. A. . Controle de Suavização de Potência de Aerogeradores com BESS Baseado em Lógica Fuzzy. *RBS Magazine - Revista Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica*, 2020.
- LEITE, J. H. A.; BRETAS, N. G. ; ROSAS, P. A. C. ; MARQUES, D. C. ; TABOSA, P. . Aplicação de Sistemas de Armazenamento de Energia Elétrica para a Melhora da Margem de Estabilidade de um Sistema Elétrico de Baixa Inércia. *RBS Magazine - Revista Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica*, 2020.
- SILVA, JEYDSON ; AQUINO, RONALDO ; FERREIRA, AIDA ; MARQUES, DAVIDSON . Deep brain emotional learning-based intelligent controller applied to an inverted pendulum system. *JOURNAL OF SUPERCOMPUTING*, v. 1, p. 1, 2022.
- MARQUES, DAVIDSON C.; SILVA, JEYDSON L. ; LIRA, MILDE MARIA S. ; AQUINO, RONALDO R. B. . An emotional discrete controller PSO tuned and designed for a real industrial pumping system. *Scientific Reports*, v. 12, p. 4292, 2022.

REFERÊNCIAS

- ABADI, M.; SADEGHZADEH, S. M. A control approach with seamless transition capability for a single-phase inverter operating in a microgrid. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Elsevier, v. 111, p. 475–485, 2019. Citado na página 59.
- AHMADI, S. et al. An improved droop control for simultaneous voltage and frequency regulation in an ac microgrid using fuzzy logic. In: IEEE. *2015 23rd Iranian Conference on Electrical Engineering*. [S.l.], 2015. p. 1486–1491. Citado na página 24.
- AHMADI, S.; SHOKOOHI, S.; BEVRANI, H. A fuzzy logic-based droop control for simultaneous voltage and frequency regulation in an ac microgrid. *International journal of electrical power & energy systems*, Elsevier, v. 64, p. 148–155, 2015. Citado na página 127.
- ALCÂNTARA, M. V. P. Microrredes inteligentes: um novo modelo de negócio para a distribuição de energia elétrica. *O setor elétrico*, v. 71, p. 36–45, 2011. Citado 3 vezes nas páginas 33, 35 e 38.
- ALMEIDA, R. G. Gerenciamento e controle distribuído hierárquico primário e secundário aplicado a microrrede ca. 2019. Citado na página 78.
- AMARAL, D. G. Anatomical organization of the primate amygdaloid complex. *The amygdala: Neurobiological aspects of emotion, memory, and mental dysfunction*, Wiley-Liss, 1992. Citado na página 106.
- AMARAL, F. V. et al. Analysis and characterization of an active bypass switch for series connected power conditioners. In: IEEE. *2015 IEEE 13th Brazilian Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC)*. [S.l.], 2015. p. 1–5. Citado na página 37.
- ANDREA, D. *Lithium-Ion Batteries and Applications: A Practical and Comprehensive Guide to Lithium-Ion Batteries and Arrays, from Toys to Towns, Volume 2, Applications*. [S.l.]: Artech House, 2020. v. 2. Citado na página 168.
- ANEEL, A. N. d. E. E. *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – Prodist*. 2018. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/prodist>>. Acesso em: 19 jan. 2023. Citado 3 vezes nas páginas 37, 38 e 39.
- ANEEL-Nº819. Agência nacional de energia elétrica: Resolução normativa nº 819,. 2018. Citado na página 40.
- ARUNAN, A.; RAVISHANKAR, J.; AMBIKAIRAJAH, E. Real time stability enhancement for islanded microgrids. In: IEEE. *2017 IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT-Asia)*. [S.l.], 2017. p. 1–5. Citado na página 25.
- BAHRAMIPANAH, M. et al. An adaptive model-based real-time voltage control process for active distribution networks using battery energy storage systems. In: IEEE. *2016 Power Systems Computation Conference (PSCC)*. [S.l.], 2016. p. 1–8. Citado na página 28.

- BAKAR, N. N. A. et al. Microgrid and load shedding scheme during islanded mode: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 71, p. 161–169, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 71 e 129.
- BALKENIUS, C.; MORÉN, J. A computational model of emotional conditioning in the brain. In: *Proceedings of Workshop on Grounding Emotions in Adaptive Systems, Zurich*. [S.l.: s.n.], 1998. Citado na página 108.
- BAY, J. Behavior learning in large homogeneous populations of robots. In: *IASTED International Conference on Artificial Intelligence and Soft Computing*. [S.l.: s.n.], 1997. p. 137–140. Citado na página 96.
- BAZARGAN, D. A study of battery energy storage dynamics in power systems. IEEE, 2014. Citado 3 vezes nas páginas 85, 87 e 88.
- BAZARGAN, D.; BAHRANI, B.; FILIZADEH, S. Reduced capacitance battery storage dc-link voltage regulation and dynamic improvement using a feedforward control strategy. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, IEEE, v. 33, n. 4, p. 1659–1668, 2018. Citado 4 vezes nas páginas 73, 87, 88 e 163.
- BEHESHTI, Z.; HASHIM, S. Z. M. A review of emotional learning and it's utilization in control engineering. *Int. J. Adv. Soft Comput. Appl*, v. 2, n. 2, p. 191–208, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 99 e 109.
- BEVRANI, H. et al. Intelligent frequency control in an ac microgrid: Online pso-based fuzzy tuning approach. *IEEE transactions on smart grid*, IEEE, v. 3, n. 4, p. 1935–1944, 2012. Citado na página 127.
- BEVRANI, H.; WATANABE, M.; MITANI, Y. *Power system monitoring and control*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 36.
- BHASKARA, S. N.; CHOWDHURY, B. H. Microgrids—a review of modeling, control, protection, simulation and future potential. In: IEEE. *2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting*. [S.l.], 2012. p. 1–7. Citado 2 vezes nas páginas 34 e 56.
- BIDRAM, A.; DAVOUDI, A. Hierarchical structure of microgrids control system. *IEEE Transactions on Smart Grid*, IEEE, v. 3, n. 4, p. 1963–1976, 2012. Citado 9 vezes nas páginas 24, 58, 61, 62, 65, 66, 67, 68 e 127.
- BIDRAM, A.; DAVOUDI, A.; LEWIS, F. L. Two-layer distributed cooperative control of multi-inverter microgrids. In: IEEE. *2014 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition-APEC 2014*. [S.l.], 2014. p. 2364–2371. Citado na página 25.
- BIDRAM, A. et al. Distributed cooperative secondary control of microgrids using feedback linearization. *IEEE transactions on power systems*, IEEE, v. 28, n. 3, p. 3462–3470, 2013. Citado 4 vezes nas páginas 62, 63, 70 e 73.
- BORDON, M. E. et al. Controlador nebuloso de arquitetura simplificada estudo de caso: acionamento de motor de indução trifásico. [sn], 2004. Citado na página 93.
- BORUP, U.; BLAABJERG, F.; ENJETI, P. N. Sharing of nonlinear load in parallel-connected three-phase converters. *IEEE Transactions on Industry Applications*, IEEE, v. 37, n. 6, p. 1817–1823, 2001. Citado 3 vezes nas páginas 62, 63 e 65.

- BRABANDERE, K. D. et al. A voltage and frequency droop control method for parallel inverters. *IEEE Transactions on power electronics*, IEEE, v. 22, n. 4, p. 1107–1115, 2007. Citado na página 67.
- BUCHMANN, I. Lithium-ion batteries: Fundamentals and safety. *The Lightest Metals: Science and Technology from Lithium to Calcium*, John Wiley & Sons, p. 303, 2015. Citado na página 168.
- CALVIN, W. H. *The cerebral code: Thinking a thought in the mosaics of the mind*. [S.l.]: Mit Press, 1998. Citado na página 100.
- CARNIELETTO, R. et al. Simulation and analysis of dq frame and p+ resonant controls for voltage source inverter to distributed generation. In: *IEEE. 2009 Brazilian Power Electronics Conference*. [S.l.], 2009. p. 104–109. Citado na página 78.
- CARTER, R.; FRITH, C. D. *Mapping the mind*. [S.l.]: Univ of California Press, 1998. Citado na página 100.
- CARVALHO, H. *Controle de Microrredes CA - Estudo da Regulação de frequência e tensões*. Tese (Doutorado) — Dissertação de M. Sc., UFU, Uberlândia, GO, Brasil, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 60 e 61.
- CARVALHO, H. T. d. M. et al. Controle de microrredes ca: estudo da regulação de frequência e tensões. Universidade Federal de Uberlândia, 2019. Citado na página 78.
- CÉSAR, M. B. et al. Brain emotional learning based control of a sdof structural system with a mr damper. In: *CONTROLO 2016*. [S.l.]: Springer, 2017. p. 547–557. Citado na página 27.
- CHANDORKAR, M. C.; DIVAN, D. M.; ADAPA, R. Control of parallel connected inverters in standalone ac supply systems. *IEEE transactions on industry applications*, IEEE, v. 29, n. 1, p. 136–143, 1993. Citado 3 vezes nas páginas 63, 124 e 126.
- CHEN, C.-L. et al. Design of parallel inverters for smooth mode transfer microgrid applications. *IEEE Transactions on Power Electronics*, IEEE, v. 25, n. 1, p. 6–15, 2009. Citado na página 59.
- CHEN, J. et al. Neural network-based state of charge observer design for lithium-ion batteries. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, IEEE, v. 26, n. 1, p. 313–320, 2017. Citado na página 180.
- CHEN, S.-F. Particle swarm optimization for pid controllers with robust testing. In: *IEEE. 2007 International Conference on Machine Learning and Cybernetics*. [S.l.], 2007. v. 2, p. 956–961. Citado na página 112.
- CHIANG, H.-C.; JEN, K.-K.; YOU, G.-H. Improved droop control method with precise current sharing and voltage regulation. *IET Power Electronics*, Wiley Online Library, v. 9, n. 4, p. 789–800, 2016. Citado na página 25.
- CHUNG, Y. et al. Power quality control center for the microgri system. In: *IEEE. 2008 IEEE 2nd International Power and Energy Conference*. [S.l.], 2008. p. 942–947. Citado na página 37.
- COMMONS, W. *System Advisor Model (SAM) General Description*. 2023. Disponível em: <<https://commons.wikimedia.org>>. Acesso em: 11 jan. 2023. Citado 5 vezes nas páginas 97, 98, 101, 103 e 104.

CONEDISON, D. E. D. Specification eo-2161 - technical requirements for microgrid systems interconnected with the con edison distribution - revision 0. 2017. Citado na página 44.

DARYABEIGI, E. et al. Switched reluctance motor (srm) control, with the developed brain emotional learning based intelligent controller (belbic), considering torque ripple reduction. In: IEEE. *2009 IEEE International Electric Machines and Drives Conference*. [S.l.], 2009. p. 979–986. Citado na página 110.

DARYABEIGI, E.; MARKADEH, G. A.; LUCAS, C. Emotional controller (belbic) for electric drives—a review. In: IEEE. *IECON 2010-36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*. [S.l.], 2010. p. 2901–2907. Citado na página 110.

DAS, D.; GURRALA, G.; SHENOY, U. J. Linear quadratic regulator-based bumpless transfer in microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, IEEE, v. 9, n. 1, p. 416–425, 2016. Citado na página 59.

DAS, D.; GURRALA, G.; SHENOY, U. J. Transition between grid-connected mode and islanded mode in vsi-fed microgrids. *Sādhanā*, Springer, v. 42, p. 1239–1250, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 58 e 59.

DELILLE, G.; FRANCOIS, B.; MALARANGE, G. Dynamic frequency control support by energy storage to reduce the impact of wind and solar generation on isolated power system's inertia. *IEEE Transactions on sustainable energy*, IEEE, v. 3, n. 4, p. 931–939, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 87 e 89.

DEVELOPMENT, E.; COMMITTEE, P. G. Ieee std 421.5-2005 recommended practice for excitation system models for power system stability studies. 2005. Citado 2 vezes nas páginas 135 e 136.

DÍAZ, N. L. et al. Fuzzy droop control loops adjustment for stored energy balance in distributed energy storage system. In: IEEE. *2015 9th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE-ECCE Asia)*. [S.l.], 2015. p. 728–735. Citado na página 25.

DIVYA, K.; ØSTERGAARD, J. Battery energy storage technology for power systems—an overview. *Electric power systems research*, Elsevier, v. 79, n. 4, p. 511–520, 2009. Citado na página 26.

DORRAH, H. T.; EL-GARHY, A. M.; EL-SHIMY, M. E. Pso-belbic scheme for two-coupled distillation column process. *Journal of advanced Research*, Elsevier, v. 2, n. 1, p. 73–83, 2011. Citado na página 132.

DUNN, B.; KAMATH, H.; TARASCON, J.-M. Electrical energy storage for the grid: a battery of choices. *Science*, American Association for the Advancement of Science, v. 334, n. 6058, p. 928–935, 2011. Citado na página 85.

EBERHART, R.; KENNEDY, J. A new optimizer using particle swarm theory. In: IEEE. *Micro Machine and Human Science, 1995. MHS'95., Proceedings of the Sixth International Symposium on*. [S.l.], 1995. p. 39–43. Citado na página 112.

EID, B. M. et al. Control methods and objectives for electronically coupled distributed energy resources in microgrids: A review. *IEEE systems journal*, IEEE, v. 10, n. 2, p. 446–458, 2014. Citado 3 vezes nas páginas 36, 60 e 70.

EL-GARHY, M. A. A.-A.; MUBARAK, R.; EL-BABLY, M. Improving maximum power point tracking of partially shaded photovoltaic system by using ipso-belbic. *Journal of Instrumentation*, IOP Publishing, v. 12, n. 08, p. P08012, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 131 e 132.

ENEL. Conexão de recarga para veículos elétricos. 2019. Citado na página 44.

EPE. Recursos energéticos distribuídos: impactos no planejamento energético. *Rio de Janeiro: EPE*, 2018. Citado na página 34.

ESPERIDIÃO-ANTONIO, V. et al. Neurobiology of the emotions. *Archives of Clinical Psychiatry (São Paulo)*, SciELO Brasil, v. 35, n. 2, p. 55–65, 2008. Citado na página 95.

ETXEBERRIA, A. et al. Comparison of sliding mode and pi control of a hybrid energy storage system in a microgrid application. *Energy Procedia*, Elsevier, v. 12, p. 966–974, 2011. Citado na página 142.

FARHANGI, R.; BOROUSHAKI, M.; HOSSEINI, S. H. Load–frequency control of interconnected power system using emotional learning-based intelligent controller. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Elsevier, v. 36, n. 1, p. 76–83, 2012. Citado na página 94.

FARROKHABADI, M. et al. Battery energy storage system models for microgrid stability analysis and dynamic simulation. *IEEE Transactions on Power Systems*, IEEE, v. 33, n. 2, p. 2301–2312, 2017. Citado 6 vezes nas páginas 60, 87, 88, 89, 163 e 164.

FERGUSON, R.; HERBST, R.; MILLER, R. Analytical studies of the brushless excitation system. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems*, IEEE, v. 78, n. 4, p. 1815–1821, 1959. Citado na página 136.

FINGER, S. *Origins of neuroscience: a history of explorations into brain function*. [S.l.]: Oxford University Press, USA, 2001. 408 p. Citado na página 97.

FOGEL, L. J. Evolutionary programming in perspective: The top-down view. *Computational intelligence: Imitating life*, IEEE press, 1994. Citado na página 112.

FU, Q. et al. Transition management of microgrids with high penetration of renewable energy. *IEEE Transactions on Smart Grid*, IEEE, v. 5, n. 2, p. 539–549, 2013. Citado na página 59.

FUSTER, J. M. *The prefrontal cortex: anatomy, physiology, and neuropsychology of the frontal lobe*. [S.l.]: Raven Press, 2006. Citado na página 102.

GANJIAN-ABOUKHEILI, M. et al. Seamless transition of microgrids operation from grid-connected to islanded mode. *IEEE Transactions on Smart Grid*, IEEE, v. 11, n. 3, p. 2106–2114, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 58 e 59.

GAO, D. W. *Energy storage for sustainable microgrid*. [S.l.]: Academic Press, 2015. Citado na página 35.

GAO, F.; IRAVANI, M. R. A control strategy for a distributed generation unit in grid-connected and autonomous modes of operation. *IEEE Transactions on power delivery*, IEEE, v. 23, n. 2, p. 850–859, 2008. Citado na página 58.

GAO, H. et al. Dynamic load shedding for an islanded microgrid with limited generation resources. *IET Generation, Transmission & Distribution*, Wiley Online Library, v. 10, n. 12, p. 2953–2961, 2016. Citado na página 71.

- GAYEK, H. W. Transfer characteristics of brushless aircraft generator systems. *IEEE Transactions on Aerospace*, IEEE, v. 2, n. 2, p. 913–928, 1964. Citado na página 136.
- GIRIRAJKUMAR, S.; JAYARAJ, D.; KISHAN, A. R. Pso based tuning of a pid controller for a high performance drilling machine. *International Journal of Computer Applications*, Citeseer, v. 1, n. 19, p. 12–18, 2010. Citado na página 131.
- GKOUNTARAS, A. *Modeling techniques and control strategies for inverter dominated microgrids*. [S.l.]: Universitätsverlag der TU Berlin, 2017. v. 2. Citado na página 89.
- GODOY, P. T. de et al. Centralized secondary control assessment of microgrids with battery and diesel generator. In: IEEE. *2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference-Latin America (ISGT Latin America)*. [S.l.], 2019. p. 1–6. Citado na página 128.
- GOLBERG, D. E. Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning. *Addion wesley*, v. 1989, n. 102, p. 36, 1989. Citado na página 112.
- GOMEZ, L. A. et al. Primary frequency response of microgrid using doubly fed induction generator with finite control set model predictive control plus droop control and storage system. *IEEE Access*, IEEE, v. 8, p. 189298–189312, 2020. Citado na página 125.
- GRAY, J. A. *Elements of a two-process theory of learning*. [S.l.]: Academic Press, 1975. Citado na página 95.
- GRAY, J. A. A model of the limbic system and basal ganglia: applications to anxiety and schizophrenia. The MIT Press, 1995. Citado na página 108.
- GREEN, T. C.; PRODANOVIĆ, M. Control of inverter-based micro-grids. *Electric power systems research*, Elsevier, v. 77, n. 9, p. 1204–1213, 2007. Citado na página 24.
- GREENE, J. D. et al. An fmri investigation of emotional engagement in moral judgment. *Science*, American Association for the Advancement of Science, v. 293, n. 5537, p. 2105–2108, 2001. Citado na página 96.
- GU, W. et al. A nonlinear state estimator-based decentralized secondary voltage control scheme for autonomous microgrids. *IEEE Transactions on Power Systems*, IEEE, v. 32, n. 6, p. 4794–4804, 2017. Citado na página 129.
- GUERRERO, J. M. et al. Advanced control architectures for intelligent microgrids—part i: Decentralized and hierarchical control. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, IEEE, v. 60, n. 4, p. 1254–1262, 2013. Citado 4 vezes nas páginas 68, 69, 70 e 127.
- GUERRERO, J. M. et al. Decentralized control for parallel operation of distributed generation inverters using resistive output impedance. *IEEE Transactions on industrial electronics*, IEEE, v. 54, n. 2, p. 994–1004, 2007. Citado na página 67.
- GUERRERO, J. M. et al. Control strategy for flexible microgrid based on parallel line-interactive ups systems. *IEEE Transactions on industrial Electronics*, IEEE, v. 56, n. 3, p. 726–736, 2008. Citado na página 24.
- GUERRERO, J. M. et al. Hierarchical control of droop-controlled ac and dc microgrids—a general approach toward standardization. *IEEE Transactions on industrial electronics*, IEEE, v. 58, n. 1, p. 158–172, 2010. Citado 10 vezes nas páginas 23, 24, 25, 58, 60, 67, 68, 71, 73 e 127.

- GUERRERO, J. M. et al. A wireless controller to enhance dynamic performance of parallel inverters in distributed generation systems. *IEEE Transactions on power electronics*, IEEE, v. 19, n. 5, p. 1205–1213, 2004. Citado 4 vezes nas páginas 64, 65, 66 e 67.
- GUYTON, A. C.; HALL, J. E.; GUYTON, A. C. *Tratado de fisiologia médica*. [S.l.]: Elsevier Brasil, 2006. Citado 2 vezes nas páginas 96 e 103.
- HAN, X. et al. A comparative study of commercial lithium ion battery cycle life in electrical vehicle: Aging mechanism identification. *Journal of Power Sources*, Elsevier, v. 251, p. 38–54, 2014. Citado na página 168.
- HAN, Y. et al. Analysis of washout filter-based power sharing strategy—an equivalent secondary controller for islanded microgrid without lbc lines. *IEEE Transactions on Smart Grid*, IEEE, v. 9, n. 5, p. 4061–4076, 2017. Citado 3 vezes nas páginas 129, 130 e 131.
- HAN, Y. et al. Mas-based distributed coordinated control and optimization in microgrid and microgrid clusters: A comprehensive overview. *IEEE Transactions on Power Electronics*, IEEE, v. 33, n. 8, p. 6488–6508, 2017. Citado na página 70.
- HATZIARGYRIOU, N. *Microgrids: architectures and control*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2014. Citado na página 60.
- HATZIARGYRIOU, N. et al. Microgrids. *IEEE power and energy magazine*, IEEE, v. 5, n. 4, p. 78–94, 2007. Citado 3 vezes nas páginas 32, 36 e 53.
- HE, J.; LI, Y. W. Analysis, design, and implementation of virtual impedance for power electronics interfaced distributed generation. *IEEE Transactions on industry Applications*, IEEE, v. 47, n. 6, p. 2525–2538, 2011. Citado na página 67.
- HEBB, D. O. Drives and the cns (conceptual nervous system). *Psychological review*, American Psychological Association, v. 62, n. 4, p. 243, 1955. Citado na página 105.
- HESSE, H. C. et al. Lithium-ion battery storage for the grid—a review of stationary battery storage system design tailored for applications in modern power grids. *Energies*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 10, n. 12, p. 2107, 2017. Citado na página 85.
- HOJABRI, M. et al. An overview on current control techniques for grid connected renewable energy systems. *International Proceedings of Computer Science and Information Technology*, IACSIT Press, v. 56, p. 119, 2012. Citado na página 78.
- HOLLAND, J. H. *Induction: Processes of inference, learning, and discovery*. [S.l.]: Mit Press, 1989. Citado na página 95.
- HUAYLLAS, T. E. D. C.; RAMOS, D. S.; ARNEZ, R. L. V. Microgrid systems: Main incentive policies and performance constraints evaluation for their integration to the network. *IEEE Latin America Transactions*, IEEE, v. 12, n. 6, p. 1078–1085, 2014. Citado na página 158.
- IEC-61851. Electric vehicle conductive charging system - part 1: General requirements. 2017. Citado na página 40.
- IEC-STANDARDIZATION. Iec standardization trends related to energy infrastructure. 2014. Citado na página 42.

- IEEE-STD1547. Ieee std 1547: Ieee standard for interconnecting distributed resources with electrical power systems. 2018. Citado na página 52.
- IEEE-STD2030.8. Institute of electrical and electronic engineers, “ieee standard for the testing of microgrid controllers. p. 1–42, 2018. Citado na página 56.
- INOUE, K.; KAWABATA, K.; KOBAYASHI, H. On a decision making system with emotion. In: IEEE. *Robot and Human Communication, 1996., 5th IEEE International Workshop on*. [S.l.], 1996. p. 461–465. Citado na página 96.
- ISSA, W. R. et al. Control strategy for uninterrupted microgrid mode transfer during unintentional islanding scenarios. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, IEEE, v. 65, n. 6, p. 4831–4839, 2017. Citado na página 60.
- JAFARI, E. et al. Designing an emotional intelligent controller for ipfc to improve the transient stability based on energy function. *Journal of Electrical Engineering and Technology*, The Korean Institute of Electrical Engineers, v. 8, n. 3, p. 478–489, 2013. Citado na página 27.
- JAMALI, M. R. et al. Real time emotional control for anti-swing and positioning control of simo overhead traveling crane. *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, v. 4, n. 9, p. 2333–2344, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 94.
- KAMEL, R. M.; KERMANSHAHI, B. Enhancement of micro-grid dynamic performance subsequent to islanding process using storage batteries. *IRANIAN JOURNAL OF SCIENCE AND TECHNOLOGY TRANSACTION B-ENGINEERING*, 2010. Citado na página 37.
- KATIRAEI, F.; IRAVANI, M. R.; LEHN, P. W. Micro-grid autonomous operation during and subsequent to islanding process. *IEEE Transactions on power delivery*, IEEE, v. 20, n. 1, p. 248–257, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 57.
- KATSUHIKO, O. *Modern control engineering*. 2010. Citado na página 117.
- KAUR, A.; KAUSHAL, J.; BASAK, P. A review on microgrid central controller. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 55, p. 338–345, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 36 e 68.
- KELLY, J. P. The neural basis of perception and movement. *Principles of neural science*, Appleton & Lange Norwalk, CT, v. 1, p. 283–95, 1991. Citado 2 vezes nas páginas 103 e 108.
- KHORASHADIZADEH, S.; MAHDIAN, M. Voltage tracking control of dc-dc boost converter using brain emotional learning. In: IEEE. *2016 4th international conference on control, instrumentation, and automation (ICCIA)*. [S.l.], 2016. p. 268–272. Citado na página 27.
- KIM, J.-Y. et al. Cooperative control strategy of energy storage system and microsources for stabilizing the microgrid during islanded operation. *IEEE Transactions on Power Electronics*, IEEE, v. 25, n. 12, p. 3037–3048, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 26.
- KLOPF, A. H. A neuronal model of classical conditioning. *Psychobiology*, Springer, v. 16, n. 2, p. 85–125, 1988. Citado na página 95.
- KOLB, B.; WHISHAW, I. Q. *Fundamentals of human neuropsychology*. [S.l.]: Macmillan, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 99 e 102.

- KOZA, J. R. Genetic programming: On the programming of computers by means of natural selection. *A Bradford Book, MIT Press*, 1992. Citado na página 112.
- KROPOSKI, B. et al. *Making Microgrids Work. IEEE Power and Energy Magazine*, 6, 40-53. 2008. Citado na página 37.
- KUNDUR, P.; BALU, N. J.; LAUBY, M. G. *Power system stability and control*. [S.l.]: McGraw-hill New York, 1994. v. 7. Citado na página 133.
- LAAKSONEN, H.; KAUHANIEMI, K. et al. Control principles for blackstart and island operation of microgrid. In: HELSINKI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY. *Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics (NORPIE/2008), June 9-11, 2008, Espoo, Finland*. [S.l.], 2008. Citado na página 84.
- LAGHARI, J. et al. Application of computational intelligence techniques for load shedding in power systems: A review. *Energy conversion and management*, Elsevier, v. 75, p. 130–140, 2013. Citado na página 129.
- LASSETER, B. Microgrids [distributed power generation]. In: IEEE. *2001 IEEE power engineering society winter meeting. Conference proceedings (Cat. No. 01CH37194)*. [S.l.], 2001. v. 1, p. 146–149. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 124.
- LASSETER, R. Microgrids: Power engineering society winter meeting, 2002. *IEEE*, v. 1, n. 1, 2002. Citado na página 24.
- LASSETER, R. et al. White paper on integration of distributed energy resources. the certs microgrid concept, consortium for electric reliability technology solutions (certs). *LBNL-50829. certs. lbl. gov/pdf/50829-apdf (April 2002)*, 2002. Citado 2 vezes nas páginas 53 e 124.
- LASSETER, R.; ERICKSON, M. Integration of battery-based energy storage element in the certs microgrid. *University of Wisconsin-Madison, Oct*, 2009. Citado na página 83.
- LEDOUX, J.; FELLOUS, J. M. Emotion and computational neuroscience. In: *Handbook of brain theory and neural networks*. [S.l.]: MIT Press, 1995. Citado 3 vezes nas páginas 96, 99 e 105.
- LEDOUX, J. E. In search of an emotional system in the brain: leaping from fear to emotion and consciousness. The MIT Press, 1995. Citado na página 103.
- LI, Q. et al. Agent-based decentralized control method for islanded microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, IEEE, v. 7, n. 2, p. 637–649, 2015. Citado na página 25.
- LI, Y. W.; KAO, C.-N. An accurate power control strategy for power-electronics-interfaced distributed generation units operating in a low-voltage multibus microgrid. *IEEE Transactions on Power Electronics*, IEEE, v. 24, n. 12, p. 2977–2988, 2009. Citado 3 vezes nas páginas 59, 66 e 67.
- LIDULA, N.; RAJAPAKSE, A. Microgrids research: A review of experimental microgrids and test systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 15, n. 1, p. 186–202, 2011. Citado na página 24.
- LIU, S.; WANG, X.; LIU, P. X. Impact of communication delays on secondary frequency control in an islanded microgrid. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, IEEE, v. 62, n. 4, p. 2021–2031, 2014. Citado na página 128.

- LOPES, J. A. P.; MADUREIRA, A. G.; MOREIRA, C. C. L. M. A view of microgrids. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*, Wiley Online Library, v. 2, n. 1, p. 86–103, 2013. Citado na página 54.
- LOPES, J. P.; MOREIRA, C. L.; MADUREIRA, A. Defining control strategies for microgrids islanded operation. *IEEE Transactions on power systems*, IEEE, v. 21, n. 2, p. 916–924, 2006. Citado 3 vezes nas páginas 58, 71 e 129.
- LOU, G. et al. A unified control scheme based on a disturbance observer for seamless transition operation of inverter-interfaced distributed generation. *IEEE Transactions on Smart Grid*, IEEE, v. 9, n. 5, p. 5444–5454, 2017. Citado na página 59.
- LOU, G. et al. Decentralised secondary voltage and frequency control scheme for islanded microgrid based on adaptive state estimator. *IET Generation, Transmission & Distribution*, Wiley Online Library, v. 11, n. 15, p. 3683–3693, 2017. Citado na página 129.
- LU, C.-F.; LIU, C.-C.; WU, C.-J. Effect of battery energy storage system on load frequency control considering governor deadband and generation rate constraint. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, IEEE, v. 10, n. 3, p. 555–561, 1995. Citado na página 28.
- LUCAS, C.; RASHIDI, F.; ABDI, J. Transient stability improvement in power systems via firing angle control of tcsc using context based emotional controller. In: IEEE. *Automation Congress, 2004. Proceedings. World*. [S.l.], 2004. v. 16, p. 37–42. Citado 3 vezes nas páginas 27, 93 e 94.
- LUCAS, C.; SHAHMIRZADI, D.; SHEIKHOLESAMI, N. Introducing belbic: brain emotional learning based intelligent controller. *Intelligent Automation & Soft Computing*, Taylor & Francis, v. 10, n. 1, p. 11–21, 2004. Citado 4 vezes nas páginas 93, 94, 110 e 187.
- MA, T.; YANG, H.; LU, L. Solar photovoltaic system modeling and performance prediction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 36, p. 304–315, 2014. Citado na página 90.
- MACHOWSKI, J. et al. *Power system dynamics: stability and control*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2020. Citado na página 135.
- MAREN, S. Long-term potentiation in the amygdala: a mechanism for emotional learning and memory. *Trends in neurosciences*, Elsevier, v. 22, n. 12, p. 561–567, 1999. Citado na página 95.
- MARKADEH, G. et al. Speed and flux control of induction motors using emotional intelligent controller. *IEEE Transactions on Industry Applications*, IEEE, v. 47, n. 3, p. 1126–1135, 2011. Citado 3 vezes nas páginas 94, 110 e 111.
- MARQUES, D. C. et al. An emotional discrete controller pso tuned and designed for a real industrial pumping system. *Scientific Reports*, Nature Publishing Group UK London, v. 12, n. 1, p. 4292, 2022. Citado na página 132.
- MATHWORKS. *Model Battery Matlab*. 2023. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/help/matlab/>>. Acesso em: 11 fev. 2023. Citado na página 86.
- MEDINA, P. et al. Electrical energy storage systems: technologies’ state-of-the-art, techno-economic benefits and applications analysis. In: IEEE. *2014 47th Hawaii International Conference on System Sciences*. [S.l.], 2014. p. 2295–2304. Citado na página 23.

- MÉGEL, O.; MATHIEU, J. L.; ANDERSSON, G. Maximizing the potential of energy storage to provide fast frequency control. In: IEEE. *IEEE PES ISGT Europe 2013*. [S.l.], 2013. p. 1–5. Citado na página 28.
- MEHRABIAN, A.; LUCAS, C. Intelligent-adaptive flight control with a physiologically motivated algorithm. *International Journal of Modelling and Simulation*, Taylor & Francis, v. 29, n. 1, p. 12–18, 2009. Citado na página 94.
- MEHRABIAN, A. R.; LUCAS, C. A toolbox for brain emotional learning based intelligent controller. In: IEEE. *2006 IEEE International Conference on Engineering of Intelligent Systems*. [S.l.], 2006. p. 1–5. Citado 2 vezes nas páginas 110 e 111.
- MEHRABIAN, A. R.; LUCAS, C.; ROSHANIAN, J. Aerospace launch vehicle control: an intelligent adaptive approach. *Aerospace Science and technology*, Elsevier, v. 10, n. 2, p. 149–155, 2006. Citado 3 vezes nas páginas 94, 110 e 111.
- MERCY, D.; GIRIRAJKUMAR, S. An algorithmic approach based pso-pid tuning of a real time conical tank process used in waste water treatment. In: IEEE. *2017 International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC)*. [S.l.], 2017. p. 871–876. Citado na página 131.
- MILANO, F.; MINANO, R. Z. Study of the interaction between wind power plants and smes systems. In: *12th Wind Integration Workshop*. [S.l.: s.n.], 2013. Citado na página 142.
- MILASI, R.; LUCAS, C.; ARAABI, B. N. Intelligent modeling and control of washing machine using llnf modeling and modified belbic. In: IEEE. *2005 International Conference on Control and Automation*. [S.l.], 2005. v. 2, p. 812–817. Citado na página 110.
- MOHAMED, Y. A.-R. I.; RADWAN, A. A. Hierarchical control system for robust microgrid operation and seamless mode transfer in active distribution systems. *IEEE Transactions on Smart Grid*, IEEE, v. 2, n. 2, p. 352–362, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 59 e 126.
- MOHAMED, Y. A.-R. I. et al. Seamless formation and robust control of distributed generation microgrids via direct voltage control and optimized dynamic power sharing. *IEEE Transactions on Power Electronics*, IEEE, v. 27, n. 3, p. 1283–1294, 2011. Citado na página 59.
- MOHAMMDI-MILASI, R.; LUCAS, C.; NAJAR-ARRABI, B. A novel controller for a power system based belbic (brain emotional learning based intelligent controller). In: IEEE. *Automation Congress, 2004. Proceedings. World*. [S.l.], 2004. v. 16, p. 409–420. Citado na página 186.
- MONGKOLTANATAS, J. *Energy storage for stability of microgrids*. Tese (Doutorado), 2014. Citado na página 27.
- MOREN, J. *Emotion and learning-A computational model of the amygdala*. [S.l.]: Lund University Cognitive Science, 2002. v. 93. Citado 5 vezes nas páginas 98, 99, 105, 107 e 108.
- MORÉN, J.; BALKENIUS, C. A computational model of emotional learning in the amygdala. *From animals to animats*, MIT Press Cambridge, MA, v. 6, p. 115–124, 2000. Citado 6 vezes nas páginas 93, 94, 105, 106, 107 e 187.
- MOWRER, O. *Learning theory and behavior*. John Wiley & Sons Inc, 1960. Citado na página 95.

- MUKHERJEE, N.; STRICKLAND, D. Control of cascaded dc–dc converter-based hybrid battery energy storage systems—part i: Stability issue. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, IEEE, v. 63, n. 4, p. 2340–2349, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 89 e 164.
- MUKHERJEE, N.; STRICKLAND, D. Control of cascaded dc–dc converter-based hybrid battery energy storage systems—part ii: Lyapunov approach. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, IEEE, v. 63, n. 5, p. 3050–3059, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 89 e 164.
- N. DIORIO, N.-F. J.-G. P. J. S. N. T. W. M. J. *System Advisor Model (SAM) General Description*. 2017. Disponível em: <<https://www.nrel.gov/docs/fy18osti/70414.pdf>>. Acesso em: 09 jan. 2023. Citado na página 90.
- NADAI, N. D. et al. A monte carlo simulation approach to determine critical buses in islanded microgrids. IET, 2016. Citado na página 158.
- NADIA. *Inteligência de Enxame: PSO*. 2013. Disponível em: <<http://www.eng.uerj.br/~nadia/pso.pdf>>. Acesso em: 10 out. 2017. Citado na página 115.
- NALLADURAI, S. K.; BANU, R. W. Lfc of two interconnected power system using intelligent controller method. *UPB Sci. Bull., Series C*, v. 77, n. 1, 2015. Citado na página 131.
- NARADA. *NESP (LFP) Container Solutions*. 2023. Disponível em: <<https://mpinarada.com/energy-storage-systems/>>. Acesso em: 11 fev. 2023. Citado na página 84.
- NESSE, R. Emotional disorders in evolutionary perspective. *Psychology and Psychotherapy: Theory, Research and Practice*, Wiley Online Library, v. 71, n. 4, p. 397–415, 1998. Citado na página 96.
- NETO, G. Z.; COSTA, W. T. da; VASCONCELOS, V. B. A resolução normativa nº 482/2012 da aneel: possibilidades e entraves para a microgeração distribuída. In: *Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS*. [S.l.: s.n.], 2014. Citado na página 23.
- NUELLA, I.; CHENG, C.; CHIU, M.-S. Adaptive pid controller design for nonlinear systems. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, ACS Publications, v. 48, n. 10, p. 4877–4883, 2009. Citado na página 93.
- ÖHMAN, A.; MINEKA, S. Fears, phobias, and preparedness: toward an evolved module of fear and fear learning. *Psychological review*, American Psychological Association, v. 108, n. 3, p. 483, 2001. Citado 2 vezes nas páginas 103 e 187.
- OI, A. et al. Pid optimal tuning method by particle swarm optimization. In: IEEE. *2008 SICE Annual Conference*. [S.l.], 2008. p. 3470–3473. Citado na página 112.
- O'KEEFE, J.; NADEL, L. *The hippocampus as a cognitive map*. [S.l.]: Oxford: Clarendon Press, 1978. Citado na página 104.
- OLIVARES, D. E. et al. Trends in microgrid control. *IEEE Transactions on smart grid*, IEEE, v. 5, n. 4, p. 1905–1919, 2014. Citado 4 vezes nas páginas 23, 24, 35 e 61.
- OLIVER, W. *World Energy Trilemma Index 2017*. [S.l.]: London: World Energy Council (WEC), 2020. Citado na página 34.

ONS. *Evolução da Capacidade Instalada no SIN - Abril 2023/Dezembro 2027*. 2023. Disponível em: <<https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>>. Acesso em: 28 abril. 2023. Citado na página 23.

ONS, P. d. R. Submódulo 3.6: Requisitos técnicos mínimos para a conexão as instalações de transmissão. *Rio de Janeiro*, 2019. Citado na página 37.

PACHECO. *computacao inteligente algoritmos PSO*. 2016. Disponível em: <<http://http://computacao inteligente.com.br/algoritmos/otimizacao-por-enxame-de-particulas/>>. Acesso em: 26 marco 2023. Citado na página 145.

PALIZBAN, O.; KAUHANIEMI, K.; GUERRERO, J. M. Microgrids in active network management—part ii: System operation, power quality and protection. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 36, p. 440–451, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 53 e 54.

PANKSEPP, J. Rewards, punishments, and related psychobiological processes. *Hypothalamic integration of behavior*, Marcel Dekker, p. 289–487, 1981. Citado na página 96.

PAQUETTE, A. D.; DIVAN, D. M. Providing improved power quality in microgrids: difficulties in competing with existing power-quality solutions. *IEEE Industry Applications Magazine*, IEEE, v. 20, n. 5, p. 34–43, 2014. Citado na página 37.

PEGUEROLAS-QUERALT, J.; BIANCHI, F. D.; GOMIS-BELLMUNT, O. Control of a lithium-ion battery storage system for microgrid applications. *Journal of Power Sources*, Elsevier, v. 272, p. 531–540, 2014. Citado na página 89.

PEPERMANS, G. et al. Distributed generation: definition, benefits and issues. *Energy policy*, Elsevier, v. 33, n. 6, p. 787–798, 2005. Citado na página 23.

PHOTOVOLTAICS, D. G.; STORAGE, E. Ieee application guide for ieee std 1547™, ieee standard for interconnecting distributed resources with electric power systems. 2009. Citado na página 33.

PIAGI, P.; LASSETER, R. H. Autonomous control of microgrids. In: IEEE. *2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting*. [S.l.], 2006. p. 8–pp. Citado na página 36.

PILLER, S.; PERRIN, M.; JOSSEN, A. Methods for state-of-charge determination and their applications. *Journal of power sources*, Elsevier, v. 96, n. 1, p. 113–120, 2001. Citado na página 170.

PITKÄNEN, A. *Connectivity of the rat amygdaloid complex*. In: JP Aggleton (Ed.), *The amygdala: A functional analysis (pp. 31–115)*. [S.l.]: Oxford, England: Oxford University Press, 2000. Citado na página 104.

PLANAS, E. et al. General aspects, hierarchical controls and droop methods in microgrids: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 17, p. 147–159, 2013. Citado 4 vezes nas páginas 64, 66, 69 e 70.

POPOV, M. et al. Dynamic model and control of a microgrid with passive loads. In: *IPST Conference Proceedings*. [S.l.: s.n.], 2009. Citado na página 37.

- RAHMAN, M. A. et al. Implementation of emotional controller for interior permanent-magnet synchronous motor drive. *IEEE Transactions on Industry Applications*, IEEE, v. 44, n. 5, p. 1466–1476, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 94.
- RAHMAN, M. A. et al. Implementation of emotional controller for interior permanent-magnet synchronous motor drive. *IEEE Transactions on Industry Applications*, IEEE, v. 44, n. 5, p. 1466–1476, 2008. Citado na página 94.
- RATEY, J. J. O cérebro: um guia para o usuário: como aumentar a saúde, agilidade e longevidade de nossos cérebros através das mais recentes descobertas científicas. *Rio de Janeiro: Objetiva*, 2002. Citado na página 95.
- RÊGO, L. d. O. Análise do impacto da geração eólica na regulação de frequência de sistemas de energia elétrica. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 63 e 64.
- ROCAERT, J. et al. Control of power converters in ac microgrids. *IEEE transactions on power electronics*, IEEE, v. 27, n. 11, p. 4734–4749, 2012. Citado 5 vezes nas páginas 54, 76, 80, 81 e 125.
- ROJAS, F. et al. An overview of four-leg converters: topologies, modulations, control and applications. *IEEE Access*, IEEE, 2022. Citado na página 79.
- ROLLS, E. T. A theory of emotion, and its application to understanding the neural basis of emotion. In: *Emotions*. [S.l.]: Karger Publishers, 1986. p. 325–344. Citado na página 99.
- ROLLS, E. T. Neurophysiology and functions of the primate amygdala. Wiley-Liss, 1992. Citado na página 99.
- ROLLS, E. T. A theory of emotion and consciousness, and its application to understanding the neural basis of emotion. The MIT Press, p. 1091–1106, 1995. Citado 3 vezes nas páginas 99, 102 e 103.
- ROLLS, E. T. On the brain and emotion. *Behavioral and brain sciences*, Cambridge University Press, v. 23, n. 2, p. 219–228, 2000. Citado na página 105.
- ROUHANI, H. et al. Brain emotional learning based intelligent controller applied to neurofuzzy model of micro-heat exchanger. *Expert Systems with Applications*, Elsevier, v. 32, n. 3, p. 911–918, 2007. Citado na página 94.
- ROUHANI, H. et al. Brain emotional learning based intelligent controller applied to neurofuzzy model of micro-heat exchanger. *Expert Systems with Applications*, Elsevier, v. 32, n. 3, p. 911–918, 2007. Citado na página 94.
- ROUHANI, H.; MILASI, R. M.; LUCAS, C. Speed control of switched reluctance motor (srm) using emotional learning based adaptive controller. In: IEEE. *2005 International Conference on Control and Automation*. [S.l.], 2005. v. 1, p. 330–334. Citado na página 110.
- SADEGHIEH, A.; ROSHANIAN, J.; NAJAFI, F. Implementation of an intelligent adaptive controller for an electrohydraulic servo system based on a brain mechanism of emotional learning. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 9, n. 3, p. 84, 2012. Citado na página 27.

- SAHOO, S. K.; SINHA, A. K.; KISHORE, N. Control techniques in ac, dc, and hybrid ac–dc microgrid: a review. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, IEEE, v. 6, n. 2, p. 738–759, 2017. Citado na página 60.
- SANGHERA, M.; ROLLS, E.; ROPER-HALL, A. Visual responses of neurons in the dorsolateral amygdala of the alert monkey. *Experimental neurology*, Elsevier, v. 63, n. 3, p. 610–626, 1979. Citado na página 106.
- SANHUEZA, C. A. A. et al. Secondary control strategies for frequency restoration in islanded microgrids with consideration of communication delays. 2016. Citado na página 24.
- SAO, C. K.; LEHN, P. W. Control and power management of converter fed microgrids. *IEEE Transactions on Power Systems*, IEEE, v. 23, n. 3, p. 1088–1098, 2008. Citado na página 67.
- SARNAT, H. G.; NETSKY, M. G. Evolution of the nervous system. Oxford, England: Oxford U. Press, 1974. Citado na página 97.
- SCE, S. C. E. C. The interconnection handbook. 2019. Citado na página 44.
- SCHACHTER, S. Some extraordinary facts about obese humans and rats. *American Psychologist*, American Psychological Association, v. 26, n. 2, p. 129, 1971. Citado na página 105.
- SENJYU, T. et al. Frequency control strategy for parallel operated battery systems based on droop characteristics by applying h control theory. In: IEEE. *2009 Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific*. [S.l.], 2009. p. 1–4. Citado na página 125.
- SHAFIEE, Q.; GUERRERO, J. M.; VASQUEZ, J. C. Distributed secondary control for islanded microgrids—a novel approach. *IEEE Transactions on power electronics*, IEEE, v. 29, n. 2, p. 1018–1031, 2013. Citado na página 25.
- SHAHMIRZADI, D. *Computational modeling of the brain limbic system and its application in control engineering*. Tese (Doutorado) — Texas A&M University, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 93 e 131.
- SHARBAFI, M. A.; LUCAS, C.; DANESHVAR, R. Motion control of omni-directional three-wheel robots by brain-emotional-learning-based intelligent controller. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, IEEE, v. 40, n. 6, p. 630–638, 2010. Citado na página 94.
- SHI, Y.; EBERHART, R. A modified particle swarm optimizer. In: IEEE. *Evolutionary Computation Proceedings, 1998. IEEE World Congress on Computational Intelligence., The 1998 IEEE International Conference on*. [S.l.], 1998. p. 69–73. Citado 2 vezes nas páginas 114 e 146.
- SHIMAMURA, A. P. Memory and frontal lobe function. The MIT Press, 1995. Citado na página 102.
- SHOKOOHI, S. et al. Intelligent secondary control in smart microgrids: an on-line approach for islanded operations. *Optimization and Engineering*, Springer, v. 19, p. 917–936, 2018. Citado na página 127.
- SILVA, T. d. F. B. d. Distributed generation and the rise of the brazilian prosumer. FGV Energia, 2016. Citado na página 34.

- SIMPSON-PORCO, J. W. et al. Secondary frequency and voltage control of islanded microgrids via distributed averaging. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, IEEE, v. 62, n. 11, p. 7025–7038, 2015. Citado na página 25.
- SOSHINSKAYA, M. et al. Microgrids: Experiences, barriers and success factors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 40, p. 659–672, 2014. Citado na página 56.
- TALAPUR, G. G. et al. A reliable microgrid with seamless transition between grid connected and islanded mode for residential community with enhanced power quality. *IEEE Transactions on Industry Applications*, IEEE, v. 54, n. 5, p. 5246–5255, 2018. Citado na página 59.
- TANABE, T. et al. Control performance verification of power system stabilizer with an edlc in islanded microgrid. *IJTPE*, v. 129, n. 1, p. 139–147, 2009. Citado na página 26.
- TAYAB, U. B. et al. A review of droop control techniques for microgrid. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 76, p. 717–727, 2017. Citado 5 vezes nas páginas 63, 65, 66, 67 e 68.
- TIRUMALA, R.; MOHAN, N.; HENZE, C. Seamless transfer of grid-connected pwm inverters between utility-interactive and stand-alone modes. In: IEEE. *APEC. Seventeenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (Cat. No. 02CH37335)*. [S.l.], 2002. v. 2, p. 1081–1086. Citado 2 vezes nas páginas 58 e 59.
- TREMBLAY, O.; DESSAINT, L.-A. Experimental validation of a battery dynamic model for ev applications. *World electric vehicle journal*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 3, n. 2, p. 289–298, 2009. Citado na página 85.
- TREMBLAY, O.; DESSAINT, L.-A.; DEKKICHE, A.-I. A generic battery model for the dynamic simulation of hybrid electric vehicles. In: IEEE. *2007 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*. [S.l.], 2007. p. 284–289. Citado na página 85.
- VALERDI, R. Heuristics for systems engineering cost estimation. *IEEE Systems Journal*, IEEE, v. 5, n. 1, p. 91–98, 2010. Citado na página 112.
- VALIZADEH, S.; JAMALI, M.-R.; LUCAS, C. A particle-swarm-based approach for optimum design of belbic controller in avr system. In: IEEE. *2008 International Conference on Control, Automation and Systems*. [S.l.], 2008. p. 2679–2684. Citado na página 110.
- VANDOORN, T. et al. Decentralized and centralized control of islanded microgrids including reserve management. *IEEE Ind Electron Mag*, p. 1–14, 2013. Citado na página 70.
- VASQUEZ, J. C. et al. Adaptive droop control applied to voltage-source inverters operating in grid-connected and islanded modes. *IEEE transactions on industrial electronics*, IEEE, v. 56, n. 10, p. 4088–4096, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 59 e 67.
- VECHIU, I. et al. Control of power converters for microgrids. *COMPEL: Int J for Computation and Maths. in Electrical and Electronic Eng.*, Emerald Group Publishing Limited, v. 30, n. 1, p. 300–309, 2011. Citado na página 35.
- VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R.; FILHO, E. R. Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays. *IEEE Transactions on power electronics*, IEEE, v. 24, n. 5, p. 1198–1208, 2009. Citado na página 90.

- WANG, J. et al. Design of a generalized control algorithm for parallel inverters for smooth microgrid transition operation. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, IEEE, v. 62, n. 8, p. 4900–4914, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 59 e 87.
- WANG, X. et al. A review of power electronics based microgrids. *Journal of Power Electronics*, v. 12, n. 1, p. 181–192, 2012. Citado na página 68.
- WANG, Y. et al. An estimator-based distributed voltage-predictive control strategy for ac islanded microgrids. *IEEE Transactions on Power Electronics*, IEEE, v. 30, n. 7, p. 3934–3951, 2014. Citado na página 129.
- WEITENBERG, E. et al. Robust decentralized secondary frequency control in power systems: Merits and tradeoffs. *IEEE Transactions on Automatic Control*, IEEE, v. 64, n. 10, p. 3967–3982, 2018. Citado na página 129.
- WU, T. et al. A unified virtual power decoupling method for droop-controlled parallel inverters in microgrids. *IEEE Transactions on Power Electronics*, IEEE, v. 31, n. 8, p. 5587–5603, 2015. Citado na página 24.
- X.ENERGY. Guidelines for interconnection of electric energy storage with the electric power distribution system. 2017. Citado na página 44.
- XIN, H. et al. Control of island ac microgrids using a fully distributed approach. *IEEE Transactions on Smart Grid*, IEEE, v. 6, n. 2, p. 943–945, 2014. Citado na página 128.
- XU, Y. et al. Optimal distributed control for secondary frequency and voltage regulation in an islanded microgrid. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, IEEE, v. 15, n. 1, p. 225–235, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 69 e 70.
- YAO, Z.; XIAO, L.; YAN, Y. Seamless transfer of single-phase grid-interactive inverters between grid-connected and stand-alone modes. *IEEE transactions on power electronics*, IEEE, v. 25, n. 6, p. 1597–1603, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 58 e 59.
- YAZDAMI, A.; IRAVANI, R. Voltage sourced converters in power systems. *Wiley-IEEE Press: Hoboken, NY, USA*, v. 17, p. 91–107, 2010. Citado 5 vezes nas páginas 72, 73, 74, 89 e 172.
- YAZDANI, A.; IRAVANI, R. *Voltage-sourced converters in power systems: modeling, control, and applications*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2010. Citado 3 vezes nas páginas 74, 77 e 121.
- YI, H. A sliding mode control using brain limbic system control strategy for a robotic manipulator. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 12, n. 11, p. 158, 2015. Citado na página 27.
- ZENG, Z. et al. Topologies and control strategies of multi-functional grid-connected inverters for power quality enhancement: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 24, p. 223–270, 2013. Citado na página 79.
- ZHANG, Y. et al. A novel svpwm modulation scheme. In: IEEE. *2009 Twenty-Fourth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*. [S.l.], 2009. p. 128–131. Citado na página 79.
- ZHENG, F. et al. Design of a novel hybrid control strategy for es grid-connected inverter for smooth microgrid transition operation. *IEEE Access*, IEEE, v. 7, p. 171950–171965, 2019. Citado na página 59.

ZHOU, Q. et al. Two-stage load shedding for secondary control in hierarchical operation of islanded microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, IEEE, v. 10, n. 3, p. 3103–3111, 2018. Citado na página 71.

ZIA, M. F.; ELBOUCHIKHI, E.; BENBOUZID, M. Microgrids energy management systems: A critical review on methods, solutions, and prospects. *Applied energy*, Elsevier, v. 222, p. 1033–1055, 2018. Citado na página 54.

ZURADA, J. M. et al. *Computational intelligence imitating life*. [S.l.], 1994. Citado na página 112.

