

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO–USP
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Rodolpho Vilela Alves Neves

**Controlador secundário fuzzy
multitarefa aplicado à operação
autônoma de microrredes CA**

São Carlos
2018

Rodolpho Vilela Alves Neves

**Controlador secundário fuzzy
multitarefa aplicado à operação
autônoma de microrredes CA**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia de São Carlos como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Ciências.

Área de concentração: Sistemas Dinâmicos

Orientadora: Vilma Alves de Oliveira

São Carlos

2018

Trata-se da versão corrigida da tese. A versão original se encontra disponível na EESC/USP que aloja o Programa de Pós-Graduação de Engenharia Elétrica.

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

N511c Neves, Rodolpho Vilela Alves
 Controlador secundário fuzzy multitarefa aplicado à
 operação autônoma de microrredes CA / Rodolpho Vilela
 Alves Neves; orientadora Vilma Alves de Oliveira. São
 Carlos, 2018.

 Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em
 Engenharia Elétrica e Área de Concentração em Sistemas
 Dinâmicos -- Escola de Engenharia de São Carlos da
 Universidade de São Paulo, 2018.

 1. Controlador fuzzy. 2. Controle secundário. 3.
 Controle descentralizado. 4. Microrrede CA. 5. Controle
 hierárquico. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **RODOLPHO VILELA ALVES NEVES**.

Título da tese: "Controlador secundário *fuzzy* multitarefa aplicado à operação autônoma de microrredes CA".

Data da defesa: 24/04/2018.

Comissão Julgadora:

Resultado:

Profa. Titular **Vilma Alves de Oliveira**
(Orientadora)
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Prof. Dr. **Ricardo Quadros Machado**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Prof. Dr. **Luiz Antônio de Souza Ribeiro**
(Universidade Federal do Maranhão/UFMA)

APROVADO

Prof. Dr. **Valter Júnior de Souza Leite**
(Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais/CEFET-MG)

APROVADO

Prof. Dr. **José Antenor Pomilio**
(Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP)

Aprovado

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica:
Prof. Associado **Luís Fernando Costa Alberto**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Luís Fernando Costa Alberto**

*Esta tese é dedicada à amizade.
Não há vitória sem compartilhar momentos.*

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço a Deus pelas oportunidades que me foram concedidas e por todas as bênçãos derramadas durante estes anos de estudo.

Desde criança, sempre fui incentivado a buscar nos estudos oportunidades de crescimento pessoal e profissional. Então, agradeço aos meus pais, Cida e Alípio, por toda ajuda que puderam oferecer para que esta busca fosse possível de ser realizada. Aos meus irmãos, Brayan e Ana Laura, pela amizade e compreensão por não poder estar sempre por perto.

Em todos os momentos de dificuldades e angústia durante o período de doutoramento, uma luz sempre indicou a direção para onde eu deveria focar minhas ações e atenções. Esta luz sempre veio em formas de conselhos e puxões de orelhas dados pela minha orientadora, Profa. Vilma A. Oliveira. A você agradeço pela amizade, confiança, ensinamentos, paciência e muitos empurrões. Muito desta trajetória durante a pós-graduação só foi possível com sua ajuda. Obrigado por tudo e principalmente por sempre ser inspiração de muito trabalho para seus alunos.

Minha primeira oportunidade na USP/São Carlos foi graças ao Prof. Ricardo Q. Machado, que me indicou para a Profa. Vilma e me acolheu junto ao LAFAPE. Obrigado Prof. Ricardo pelas palavras de amizade e incentivo, sempre mostrando que o trabalho de pesquisador se faz aos poucos, respondendo uma pergunta de cada vez.

Ao Prof. José Carlos V. M. Jr., por todo o conhecimento discutido durante o acompanhamento de todo o trabalho, tanto durante o mestrado quanto no doutorado.

I also would like to acknowledge Prof. Frede Blaabjerg and Associate Prof. Xiongfei Wang for looking after me during my internship in Aalborg, Denmark. Thank you for sharing such an amazing experience and showing me another way to research. It really changed the way I see the world now.

To all the friends that I've made around the world Viktória, Niki, Samuel, Monica, Clara, Yongheng, Markus, Zian, Haofeng, Changwoo, Casper, Miguel, Jorge, Kazem, Esmail, and allowed my intership to be the most awesome experience that I've ever had. You're great pals!

Aos amigos do container, Giann, Augusto e, especialmente, Elian, que sempre estiveram ao meu lado, nos momentos de dificuldade e alegrias que só quem trabalha ali dentro sabe como são. Todo dia é uma surpresa nova que nos motiva a sermos sempre melhores do que no dia anterior.

Aos companheiros do Laboratório de Controle pela amizade e momentos de aprendizagem compartilhados em especial ao Elmer e ao Heitor por serem companheiros da saga do doutoramento.

Aos colegas do Laboratório de Fontes Alternativas e Processamento de Energia, em especial ao Cassius, Amílcar e Guilherme, obrigado pelas ideias compartilhadas e momentos de interação.

Aos funcionários do SEL pelo pronto atendimento e auxílio nas tarefas que possibilitaram o andamento do trabalho, principalmente a Vera, pelo café, ao Rui Bertho e ao Odair, por toda assistência, e ao pessoal da secretaria, Marisa e Jussara.

À República do Alabama, os meus sinceros agradecimentos. Espero que a amizade cultivada dentro desta casa esteja sempre viva e calorosa. Breno, Renan, Suetake, Nuno, Renzo, PV, Urso, Fabrício e Goiás, obrigado pelos momentos de distração e companheirismo.

Aos amigos de infância que Fabriciano me deu, Patrícia, João, Vinícius, Gleice e Lucas, obrigado por todos os momentos que foram possíveis de serem compartilhados.

Obrigado aos brasileiros que fizeram o período de intercâmbio parecer minha casa, Erika, Felipe, Milena, Letícia, Yuri, Rafhael, Patrícia, Nathália, Simon, Luiz e Candinha. Um obrigado especial à Fabiana e ao Eduardo, que me guiaram para o caminho certo na hora que eu mais precisei de uma mão amiga.

Às muitas pessoas que passaram no meu caminho durante todos esses anos, sejam elas em São Carlos, Aalborg, Viçosa ou Fabriciano, todas deixaram alguma marca única.

À Liliana, por sempre ser fonte de inspiração e ter torcido para que esta tese fosse terminada. Tenho muito a te agradecer por todos os anos de amizade, obrigado.

À Fapesp pelo auxílio e financiamento deste projeto através do processo 20170-5/2011 e 2016/25017-1, à Capes pela bolsa de estudos e ao CNPq pela bolsa do doutorado sanduíche 233605/2014-2.

“Hakuna Matata.”
(Timão – O Rei Leão, 1994)

Resumo

Neves, Rodolpho Vilela Alves **Controlador secundário fuzzy multitarefa aplicado à operação autônoma de microrredes CA**. 127 p. Tese de doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2018.

Esta tese trata do problema de controle de microrredes de corrente alternada (CA) operando segundo uma estrutura de controle hierárquica. O método de compartilhamento comumente utilizado em microrredes CA é o controle em *droop* para frequência e tensão, por não utilizar uma estrutura de comunicação entre os sistemas de geração distribuída (GDs). Entretanto, a estratégia utilizando controladores *droop* possui a desvantagem de operar com desvios de frequência e tensão, que devem ser corrigidos através de uma malha de controle secundária. Caso a microrrede opere conectada à rede de distribuição é necessário o chaveamento de uma malha de controle terciária, responsável por regular a potência injetada. Este trabalho propõe um controlador multitarefa secundário fuzzy (CSF) para microrredes CA. Atuando apenas no nível secundário, o controlador proposto deve possibilitar a operação isolada e conectada da microrrede, controlando as variáveis do nível secundário (tensão/frequência) e do nível terciário (potência ativa/reactiva), simultaneamente, sem transitar pelos diferentes níveis do controle hierárquico. Testes de simulação foram feitos para dois tipos diferentes de microrredes, uma baseada em conversores CC-CA, com aplicações para disponibilizar energia provinda de fontes renováveis, e outra baseada em geradores síncronos, como sistemas de backup, a gás ou geradores diesel. Análises de estabilidade são apresentadas para mostrar que o CSF mantém a estabilidade dentro do intervalo de operação proposto para a microrrede. Por fim, resultados experimentais obtidos em bancada com uma microrrede baseada em conversores são mostrados para validar a operação do CSF e comparar com o controlador hierárquico convencional. O controlador proposto corrige os desvios da mesma forma que os controladores secundários convencionais, durante a operação isolada da rede, e permite o fornecimento de potência para a rede de distribuição na qual a microrrede está conectada, sem o chaveamento de controladores das camadas hierárquicas.

Palavras-chave: Controlador fuzzy. Controle secundário. Controle descentralizado. Microrrede CA. Controle hierárquico.

Abstract

Neves, Rodolpho Vilela Alves **Multitask fuzzy secondary controller applied to autonomous AC microgrid operation**. 127 p. Ph.D. Thesis – São Carlos School of Engineering, University of São Paulo, 2018.

This thesis addresses the AC microgrid control problem operating with a hierarchical control structure. A common method of sharing load is using frequency and voltage droop controllers as in this method there is no need to have communication links in the microgrid. However, the droop control strategy has a drawback which is to impose voltage and frequency deviations, that can be fixed through a secondary control loop. If the microgrid operates connected to the grid, there must be a switching to a tertiary control layer to regulate the injected power. This research proposes a multitask fuzzy secondary controller (FSC) applied to AC microgrids. Acting only in the secondary layer, the proposed controller has to allow the islanded and connected microgrid operation, regulating the secondary layer's variables (voltage and frequency levels) and the tertiary layer's variables (active and reactive powers), simultaneously, without switching among the hierarchical control layers. Simulations were carried out for two different kinds of microgrid, one based on power inverters, that can be applied to renewable power sources, and another one based on synchronous generators, like diesel backup generation systems. Stability analysis are presented showing that the FSC keeps the microgrid stable while operating within a given operation range. Lastly, a microgrid simulation test bed based on power inverters is presented to validate the FSC operation and to compare to conventional hierarchical controller's operation. The proposed FSC fixes the deviations in the same way than the conventional controllers, during the islanded operation tests, and allows the microgrid to inject power into the grid without switching to other controllers of the hierarchical structure.

Keywords: Fuzzy controller. Secondary control. Decentralised control. AC microgrid. Hierarchical control.

Lista de ilustrações

Figura 1.1	Exemplo de uma microrrede CA, com associação de fontes alternativas, bateria, gerador diesel, carga local e rede de distribuição.	28
Figura 1.2	Hierarquia e funções dos controladores de uma microrrede, adaptado de Bidram e Davoudi (2012).	31
Figura 2.1	Diagrama de uma GD composta por um GMG, adaptado de Reis et al. (2014).	36
Figura 2.2	Diagrama geral do conversor conectado com a GD e seus controladores de tensão e corrente, adaptado de Rocabert et al. (2012).	37
Figura 2.3	Circuito equivalente monofásico de duas GDs conectadas através de uma impedância.	39
Figura 2.4	Diagrama de uma GD composta por um GMG, com controle em <i>droop</i>	41
Figura 2.5	Diagrama geral do conversor conectado com a GD, seus controladores e os controladores <i>droop</i>	41
Figura 2.6	Relação entre a (a) frequência com a potência ativa e a (b) tensão com a potência reativa empregada nas GD da microrrede.	42
Figura 2.7	Efeito do erro de regime causado pela operação com controle em <i>droop</i>	43
Figura 2.8	Hierarquia de controle para operação a microrrede operando de modo isolado, adaptado de Olivares et al. (2014). As linhas tracejadas representam os sistema de Comunicação para levar a informação do PCC para o controle secundário e do controle secundário para os controles primários.	45
Figura 2.9	Diagrama do controlador secundário.	45
Figura 2.10	Atuação do controlador secundário nos controladores <i>droop</i>	46
Figura 2.11	Controlador secundário convencional corrigindo o desvio de frequência causado pelo controlador <i>droop</i>	47

Figura 2.12	Hierarquia de controle para a microrrede operando de modo conectado, adaptado de Olivares et al. (2014). As linhas tracejadas representam os <i>links</i> de comunicação para levar a informação do PCC e da MR para os controladores terciários, secundários e primários.	48
Figura 2.13	Diagrama controlador terciário.	48
Figura 2.14	Atuação do controlador terciário nos controladores <i>droop</i>	49
Figura 2.15	Controlador terciário convencional controlando a potência que a microrrede fornece ao PCC.	49
Figura 2.16	Estrutura do sistema de sincronismo utilizado por Marafão (2004).	50
Figura 3.1	Entradas e saídas da inferência do controlador secundário fuzzy de frequência e tensão proposto e suas respectivas entradas e saídas.	54
Figura 3.2	Função de pertinência da entrada e_ω . As mesmas funções de pertinência foram utilizadas para e_E	56
Figura 3.3	Funções de pertinência para as entradas $d\omega$ e dE	56
Figura 3.4	Distribuição das funções de pertinência para a entrada $\%S_n$	56
Figura 3.5	Funções de pertinência para os erros de potência e_P e e_Q	57
Figura 3.6	Funções de pertinência para as saídas $\Delta\omega_2$ e ΔE_2	57
Figura 3.7	Variação da reta do <i>droop</i> de acordo com a entrada e_ω	59
Figura 3.8	Variação da reta do <i>droop</i> de acordo com a entrada e_E	60
Figura 3.9	Atitude do CSF para e_ω e e_P “Negativos”.	60
Figura 3.10	Atitude do CSF para e_ω “Negativo” e e_P “Zero”.	61
Figura 3.11	Atitude do CSF para e_ω “Negativo” e e_P “Positivo”.	61
Figura 3.12	Atitude do CSF para $e_\omega=0$ e $e_P<0$	62
Figura 3.13	Atitude do CSF para e_ω e e_P nulos.	62
Figura 3.14	Atitude do CSF para e_ω “Zero” e e_P “Positivo”.	63
Figura 3.15	Atitude do CSF para $e_\omega>0$, $\%S_n<0,9$ e os três pontos de operação para e_P	63
Figura 3.16	Fluxograma com o resumo das condições de operação do CSF utilizado para implementação das regras para a saída $\Delta\omega_2$	64
Figura 3.17	Fluxograma com o resumo das condições de operação do CSF utilizado para implementação das regras para a saída ΔE_2 . Os nomes variáveis linguísticas de $\%S_n$ foram abreviadas para efeito de visualização, no qual “V” é “Vazio”, “C” é “Carregado” e “Sc” é “Sobrecarregado”.	65
Figura 3.18	Estrutura do CSF com os ganhos de entrada e controladores de saída.	65
Figura 3.19	Controle hierárquico da microrrede com o controlador multitarefas fuzzy.	69
Figura 3.20	Controle hierárquico da microrrede com o controlador multitarefas fuzzy desacoplado pelas considerações $d\omega$ e dE como “Quase zero” e $\%S_n$ para “Vazio”.	70

Figura 3.21	Superfícies fuzzy para $[e_\omega, e_P, \Delta\omega_2]$ e $[e_E, e_Q, \Delta E_2]$, adquirida a partir da consideração $d\omega$ e dE sendo “Quase zero” e $\%S_n$ como “Vazio”.	71
Figura 3.22	Controle hierárquico da microrrede com a lógica multitarefa fuzzy representada pelos ganhos $K_{CSF,\omega}$, $K_{CSF,P}$, $K_{CSF,E}$ e $K_{CSF,Q}$	72
Figura 3.23	Curvas com as relações entrada e saída da lógica fuzzy multitarefa para determinar a faixa do ganho $K_{CSF,\omega}$, a partir de valores de e_P fixos.	73
Figura 3.24	Curvas com as relações entrada e saída da lógica fuzzy multitarefa para determinar a faixa do ganho $K_{CSF,P}$, a partir de valores de e_ω fixos.	73
Figura 3.25	Incertezas dos ganhos da lógica multitarefa fuzzy descritas via transformação linear fracionária.	74
Figura 3.26	Controle hierárquico com o CSF representado por incertezas para análise da estabilidade.	75
Figura 3.27	Diagrama 2 blocos-padrão para realizar a análise μ	76
Figura 4.1	Diagrama geral da microrrede com dois inversores operando em paralelo e conectados à rede utilizando o controlador CSF proposto.	78
Figura 4.2	Diagrama dos controladores da microrrede utilizando o CHC.	79
Figura 4.3	Malha de controle da corrente no indutor do filtro de saída da GD.	79
Figura 4.4	Diagrama de Bode da malha aberta do controle de corrente sem o controlador, com o controlador e de malha fechada (funções de transferência no Apêndice A).	80
Figura 4.5	Malha de controle da tensão no capacitor do filtro de saída da GD.	81
Figura 4.6	Diagrama de Bode da malha aberta do controle de tensão sem o controlador, com o controlador e de malha fechada (funções de transferência no Apêndice A).	81
Figura 4.7	Malhas de controle dos inversores com o controlador <i>droop</i>	82
Figura 4.8	Malhas de controle secundário de frequência e de tensão.	84
Figura 4.9	Diagrama de Bode da malha aberta do controle de frequência secundário sem o controlador, com o controlador e de malha fechada (funções de transferência no Apêndice A).	85
Figura 4.10	Diagrama de Bode da malha aberta do controle de tensão secundário sem o controlador, com o controlador e de malha fechada (funções de transferência no Apêndice A).	86
Figura 4.11	Diagrama de Bode para a rejeição das perturbações causadas pelos <i>droop</i> de frequência (ω_{pcc}/P_{inst}) e tensão (E_{pcc}/Q_{inst} , funções de transferência no Apêndice A).	87
Figura 4.12	Malhas de controle terciário de potência ativa e reativa.	87
Figura 4.13	Diagrama de Bode da malha aberta do controle de potência ativa terciário sem o controlador, com o controlador e de malha fechada (funções de transferência no Apêndice A).	88

Figura 4.14	Diagrama de Bode da malha aberta do controle de potência reativa terciário sem o controlador, com o controlador e de malha fechada (funções de transferência no Apêndice A).	89
Figura 4.15	Lugar das raízes para a malha de controle de frequência para $K_{CSF,P} = K_{CSF,P,nom}$ e diferentes valores de $K_{CSF,\omega}$	91
Figura 4.16	Lugar das raízes para a malha de controle de potência ativa para $K_{CSF,\omega} = K_{CSF,\omega,nom}$ e diferentes valores de $K_{CSF,P}$	92
Figura 4.17	Lugar das raízes para a malha de controle de tensão para $K_{CSF,Q} = K_{CSF,Q,nom}$ e diferentes valores de $K_{CSF,E}$	94
Figura 4.18	Lugar das raízes para a malha de controle de potência reativa para diferentes valores de $K_{CSF,Q}$ e $K_{CSF,E} = K_{CSF,E,nom}$	94
Figura 4.19	Análise $\mu(M)$ para a malha de controle com incertezas nos ganhos do CSF.	95
Figura 4.20	Frequência e tensão durante a conexão de cargas no PCC.	96
Figura 4.21	Ilhamento não intencional durante a operação da microrrede conectada à rede de distribuição. Nenhuma das estratégias estão utilizando um sistema de detecção de ilhamento.	97
Figura 4.22	Operação da microrrede utilizando o CHC com SDI e o CSF, após a ocorrência de um ilhamento não-intencional.	98
Figura 4.23	Frequência e tensão terminal para entradas sucessivas de cargas RL de 0,2 pu e fator de potência 0,9 atrasado.	99
Figura 4.24	operação do CHC e do CSF conectado à rede de distribuição, com alteração da referência de potência ativa e reativa.	100
Figura 4.25	operação da microrrede com o CHC e o CSF durante a ocorrência de um ilhamento não intencional.	101
Figura 4.26	operação da microrrede com o CHC (com detecção de ilhamento em 200 ms) e o CSF durante a ocorrência de um ilhamento não intencional.	102
Figura 5.1	Bancada utilizada para testes com a microrrede: dois inversores de potência com cada fonte CC, os filtros LC, o indutor de acoplamento e as placas de medição e condicionamento dos sinais.	104
Figura 5.2	Bancada utilizada para testes com a microrrede: carga conectada ao PCC e o ponto de conexão com a rede.	105
Figura 5.3	Filtro LC e indutor de acoplamento e placas de condicionamento de sinal utilizados na bancada.	105
Figura 5.4	Fonte regenerativa da Yaskawa (à esquerda) e inversor de potência da Danfoss (à direita) utilizados na bancada.	106
Figura 5.5	Placas de de conexão entre o dSPACE e o inversor FC 302.	107
Figura 5.6	Diagrama de ligações do sistema com o módulo da dSPACE e suas placas.	107
Figura 5.7	Operação dos controladores secundário para conexão da carga resistiva.	109

Figura 5.8	Operação dos controladores secundário para desconexão da carga resistiva.	109
Figura 5.9	Operação dos controladores secundário para conexão de uma carga indutiva (motor).	110
Figura 5.10	Desempenho do controlador terciário para um degrau positivo de potência ativa.	111
Figura 5.11	Desempenho do controlador terciário para um degrau negativo de potência ativa.	111
Figura 5.12	Operação do CHC com e sem um sistema de detecção de ilhamento (SDI) e do CSF durante a ocorrência de um ilhamento não intencional.	112

Lista de tabelas

Tabela 2.1	Variação da impedância em relação à R e X ($\delta = \theta_1 - \theta_2$).	40
Tabela 4.1	Ganhos dos controladores primários	82
Tabela 4.2	Ganhos dos controladores secundários	85
Tabela 4.3	Ganhos dos controladores terciários	89
Tabela 4.4	Ganhos e constantes de tempo do CSF	95
Tabela 4.5	Ganhos e constantes de tempo do CSF	99
Tabela 5.1	Parâmetros do sistema da plataforma experimental	104

Lista de siglas

CA corrente alternada

CC corrente contínua

CSF controlador secundário multitarefa fuzzy

CHC controlador hierárquico convencional

GD geração distribuída

GMG grupo motor gerador diesel

MR microrrede

PCC ponto de conexão comum

PLL *phase locked loop*

RD rede de distribuição

SDI sistema de detecção de ilhamento

Sumário

1	Introdução	27
2	Microrredes CA	35
2.1	Operação da microrrede CA	35
2.1.1	Geração distribuída baseada em máquina síncrona	36
2.1.2	Geração distribuída baseada em conversores CC-CA	37
2.1.3	Associação de fontes em paralelo e conexão com a rede	38
2.2	Controladores <i>droop</i>	38
2.3	Hierarquia dos controladores	44
2.3.1	Controle secundário	44
2.3.2	Controle terciário	46
2.3.3	Sincronismo e ilhamento da microrrede	48
3	Controlador multitarefa proposto	53
3.1	Configuração do controlador fuzzy	53
3.2	Funções de pertinência	55
3.3	Regras do CSF	58
3.4	Estrutura do controlador multitarefas	64
3.4.1	Ganhos de entrada	64
3.4.2	Controladores de saída	66
3.4.3	CSF para os inversores	67
3.4.4	CSF para o GMG	68
3.5	Análise da estabilidade	68
3.5.1	Modelagem dos ganhos do CSF como incerteza	72
4	Resultados de simulação	77
4.1	Descrição do sistema	77
4.2	Sintonia dos controladores primários	78

4.3	Sintonia e análise dos controladores hierárquicos convencionais	83
4.3.1	Sintonia dos controladores secundários	83
4.3.2	Sintonia dos controladores terciários	85
4.4	Análise do controlador proposto	89
4.4.1	Casos típicos da operação via lugar das raízes	90
4.4.2	Robustez do CSF	93
4.5	Resultados de simulação para os inversores	95
4.5.1	Microrrede operando em modo isolado com cargas locais	96
4.5.2	Ocorrência de um ilhamento não-intencional durante a operação conectada à rede de distribuição	97
4.6	Resultados de simulação de uma microrrede com GMG	98
4.6.1	Microrrede operando isolado com cargas locais	99
4.6.2	Microrrede conectada na rede de distribuição e exportando potên- cia ativa e reativa	100
4.6.3	Microrrede operando conectada na rede de distribuição e ocorrên- cia de um ilhamento não intencional	101
5	Resultados experimentais	103
5.1	Descrição do bancada	103
5.1.1	Filtro LC e indutor de acoplamento	103
5.1.2	Barramento CC e inversor de potência	105
5.1.3	Configuração da plataforma dSPACE	106
5.2	Resultados da operação isolada e conectada	108
5.2.1	Operação isolada	108
5.2.2	Operação conectada	109
5.3	Resultados da ocorrência de um ilhamento não-intencional	112
6	Conclusão	115
6.1	Trabalhos publicados	116
	Apêndices	117
	APÊNDICE A Detalhamento das funções de transferência	119
	Referências	123

Introdução

Sistemas de geração distribuída (GD) estão cada vez mais presentes no sistema elétrico pelo mundo, parte pelo apelo ambiental na utilização de fontes não poluidoras e parte pela descentralização das unidades geradoras, reduzindo custos com sistemas de transmissão e perdas por efeito Joule (RAY; MOHANTY; KISHOR, 2010). Quando uma GD possui cargas locais e consegue operar conectada ou isolada da rede de distribuição (RD), recebe o nome de microrrede (MR) (NUTKANI et al., 2015; CAI; HU, 2017), apesar de ainda não haver uma definição formal que defina o que é uma microrrede.

As microrredes podem possuir GDs provindas de fontes renováveis como solar, eólica, hídrica, biomassa ou biodiesel ou fontes não renováveis como o gás natural, diesel ou carvão. Entre esses recursos, a geração eólica e fotovoltaica estão entre as que mais se adaptam para MR, por serem mais compactas e podem ser conectadas em qualquer ponto da rede de distribuição (ROCABERT et al., 2012). A tendência para as MRs é de se tornarem mais e mais distribuídas, e assim, as áreas de consumo e geração de energia não poderão ser concebidas separadamente (GUERRERO et al., 2013a).

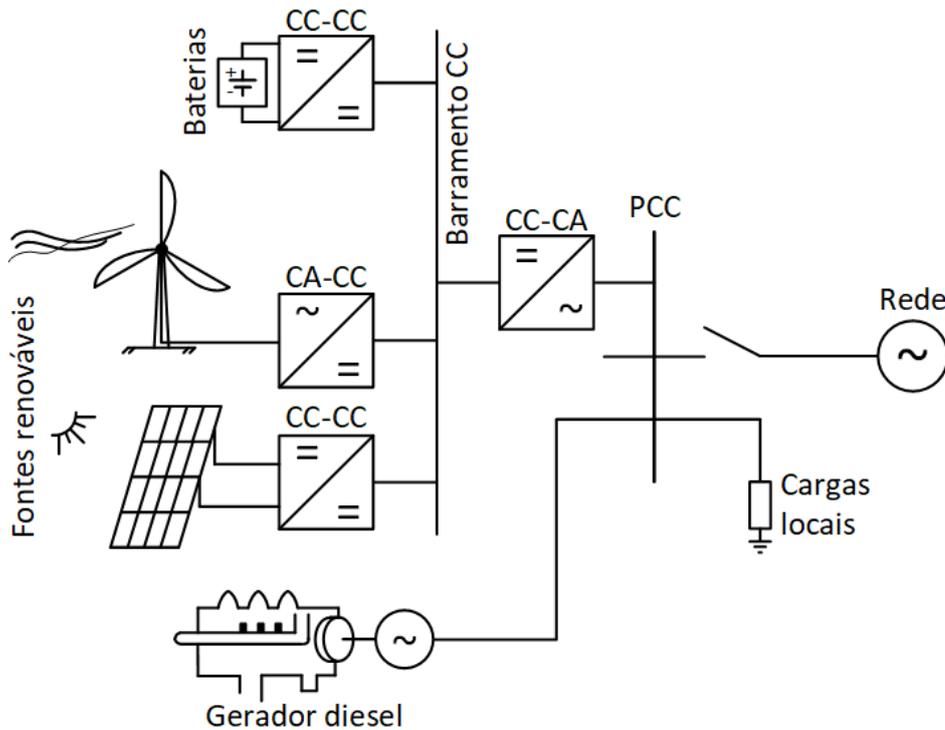
Apesar das fontes renováveis produzirem energia agredirem menos o meio ambiente, painéis fotovoltaicos e aerogeradores operam de forma intermitente, dependendo de condições temporais como radiação solar e correntes de ar. Por isso, é aconselhável a associação das fontes intermitentes com sistemas de armazenamento de energia, como baterias, *flywheels* ou ultra-capacitores (DOUCETTE; MCCULLOCH, 2011; DÍAZ et al., 2014; HU; LIAW, 2015; DÍAZ-GONZÁLEZ et al., 2015). Além de armazenadores de energia, outra associação comum é com gerador diesel, que fornece energia complementar à MR que não possui energia renovável suficiente para suas cargas locais (RAY; MOHANTY; KISHOR, 2011; RAMLI; HIENDRO; TWAHA, 2015).

Embora muitas das aplicações de MRs serem providas de fontes renováveis, que geram energia em corrente contínua (CC), grande parte das cargas que são ligadas a estas microrredes são de corrente alternada (CA). A conversão de corrente contínua para corrente alternada é feita através de conversores CC-CA (KUNDUR, 1994).

A Figura 1.1 apresenta um exemplo de uma microrrede CA composta por fontes reno-

váveis (painéis solares e gerador eólico), baterias, gerador diesel, cargas locais e conexão com a rede. O gerador eólico é conectado ao barramento CC por um conversor CA-CC

Figura 1.1: Exemplo de uma microrrede CA, com associação de fontes alternativas, bateria, gerador diesel, carga local e rede de distribuição.



Fonte: Acervo pessoal.

e os painéis fotovoltaicos e as baterias são conectados através de conversores CC-CC. Usualmente, as fontes renováveis operam em seu ponto de máxima potência e as baterias regulam a tensão no barramento CC, carregando quando há excesso de energia disponível ou descarregando para suprir a demanda do barramento (DÍAZ et al., 2014). O conversor CC-CA faz a interface entre o barramento CC e o ponto de conexão comum (PCC), que pode ou não estar conectado à RD, e pode operar de modo bidirecional, caso haja necessidade de suprir a demanda do barramento CC. No PCC, estão conectados a carga local e o gerador diesel, que fornece energia ao barramento, se necessário. Porém, ao contrário do conversor CC-CA, o gerador diesel não pode operar absorvendo potência ativa do barramento CA.

As GDs podem operar controlando diferentes variáveis, mantendo a estabilidade de uma microrrede ou não causando instabilidade quando conectadas à RD. O modo de operação da GD depende da arquitetura da microrrede em que está conectada. Se a MR possui apenas uma GD, a GD controla a amplitude e a frequência da tensão fornecida às cargas. Quando a MR possui GDs operando em paralelo, deve haver alguma estratégia que permita o compartilhamento de cargas entre estas (BIDRAM; LEWIS; DAVOUDI, 2014).

A estratégia de compartilhamento de carga pode ser feita de maneira centralizada ou descentralizada.

A estratégia centralizada é composta por um controlador central que repassa o sinal de controle para cada GD da MR, equilibrando os valores entre a potência gerada pelas fontes e a consumida pelas cargas. Embora a estratégia de controle centralizada garanta a estabilidade da microrrede, e o compartilhamento de cargas, a estratégia necessita de um sistema de comunicação de banda larga, elevando os custos de implementação e manutenção da microrrede (LU et al., 2014). Na estratégia descentralizada, cada GD possui sua malha de controle, que determina a quantidade de potência deve ser injetada na MR (JOHNSON et al., 2014), utilizando um sistema de comunicação de banda estreita ou sem sistema de comunicação (LU et al., 2014).

Uma das configurações para a estratégia descentralizada é o controle de frequência e tensão por uma das GDs e as outras GDs operando em controle de potência ativa e reativa. Porém, se a GD com controle de frequência e tensão for desligada, as outras GDs não são capazes de manter o equilíbrio entre geração e carga, tornando instável a operação da MR (KUNDUR, 1994). Outra configuração que não necessita de sistema de comunicação entre as GDs é utilizando controladores *droop* (GUERRERO et al., 2013a).

Controladores *droop* consistem na subtração de partes proporcionais às potências ativa e reativa médias, fornecida pela GD, na frequência e na tensão de referência, simulando inércias virtuais. Estas estratégias têm sido aplicadas para operação de MR, evitando o uso do sistema de comunicação e permitindo o compartilhamento de cargas entre as GDs (OLIVARES et al., 2014; XIA; PENG; WEI, 2017). Além disso, estes controladores evitam a circulação de corrente entre as GDs, o que pode danificar os conversores conectados à MR. O controlador *droop* e os controladores de tensão e frequência da GD fazem parte do nível de controle primário da MR. Entretanto, a estratégia utilizando controladores *droop* é dependente da carga que a MR está alimentando e podem impor desvios de tensão e frequência, de acordo com os parâmetros configurados no *droop* (NEZHAD; BEVRANI, 2018).

Uma maneira de minimizar ou eliminar os desvios de frequência e tensão da microrrede, após algum evento como entrada/saída de cargas, é utilizando uma malha de controle superior aos controladores *droop*. Esta malha superior é chamada de controle secundário de tensão e frequência e atua a longo prazo, se comparado com os controladores primários (controladores *droop* e os controladores principais da GD) (KUNDUR, 1994; RIVERSO et al., 2018). O controlador secundário permite que a MR opere novamente em valores nominais de frequência e tensão, durante a operação isolada da rede de distribuição. Contudo, se a MR estiver operando conectada à RD, a microrrede precisa controlar diretamente a potência que as GDs fornecem ao PCC, fazendo necessária a utilização de um controlador de potência, conhecido como controlador terciário (ANDALIB-BIN-KARIM; LIANG; ZHANG, 2017).

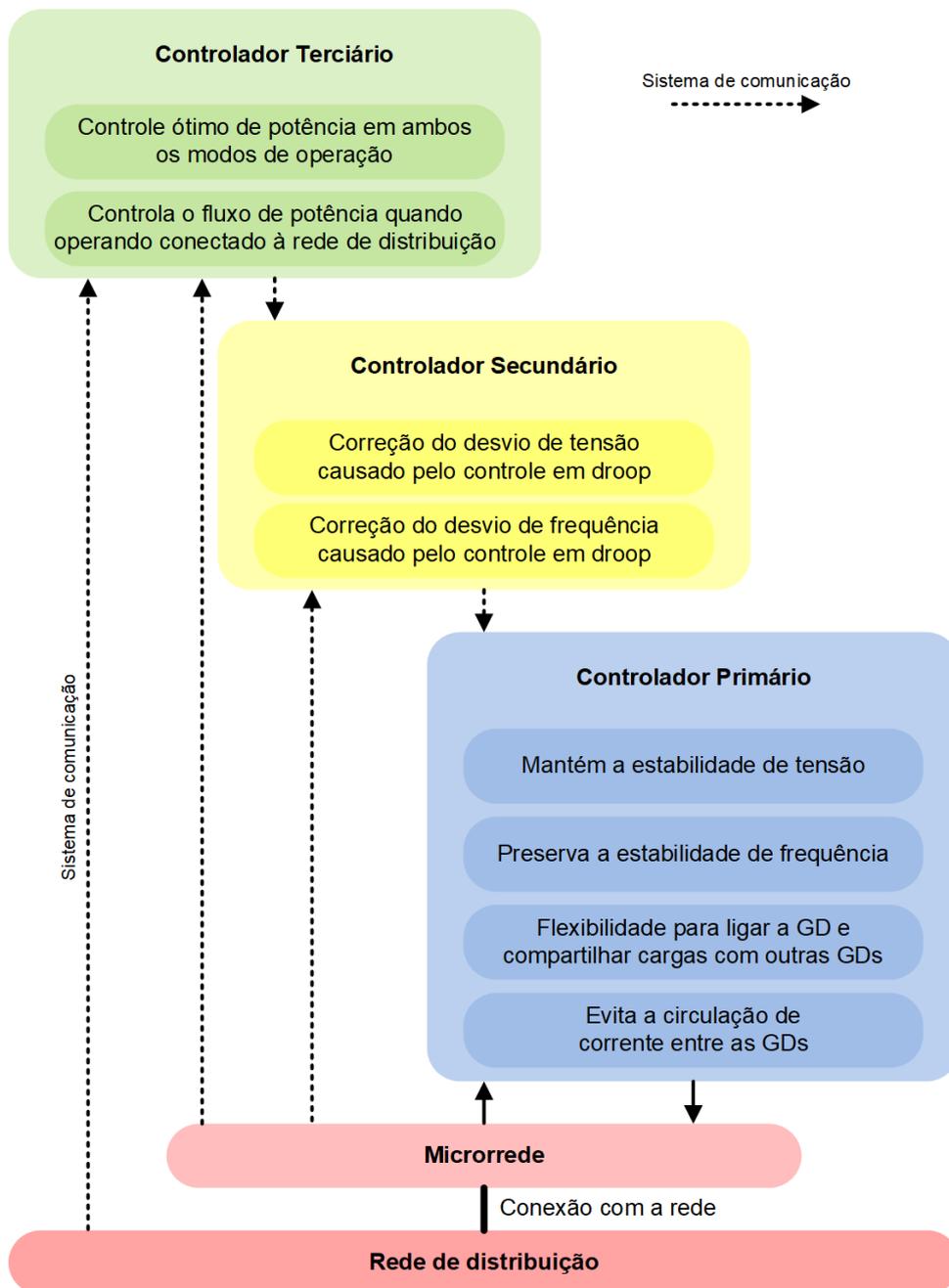
Usualmente, os controladores terciários controlam a potência despachada pelos operadores do sistema, de acordo com os contratos firmados na venda de potência para a RD. O controlador terciário ainda pode fazer o controle ótimo da potência gerada pela MR, analisando fatores como custo de geração e custo de manutenção dos equipamentos (BIDRAM; DAVOUDI, 2012). A Figura 1.2 apresenta a hierarquia e as funções de cada camada dos controladores primário, secundário e terciário. As linhas sólidas representam a transmissão do sinal diretamente, sem *links* de comunicação. As linhas tracejadas representam as comunicações que são feitas através de *links*, ou de uma rede de comunicação, seja ela *wireless* ou através de cabos.

Muitas pesquisas consideraram o uso de sistemas de comunicação entre os controladores das GDs para fins de restauração, compartilhamento de carga e gerenciamento (GUERRERO et al., 2013a). Assim, a atuação do controle secundário é feita através de um sistema de comunicação de banda estreita (ROCABERT et al., 2012; GUERRERO et al., 2013a; LU et al., 2014; MICALLEF et al., 2014; SHAFIEE et al., 2017; GAO; AI, 2018; RIVERSO et al., 2018; CHEN; XIAO, 2018), para as GDs que operam em paralelo na MR ou localmente, através de medidas locais disponíveis para a GD (PARREIRA et al., 2014; DÍAZ et al., 2014; AHMADI; SHOKOOHI; BEVRANI, 2015; REY et al., 2017).

Devido à natureza distribuída da MR, distanciamento entre cada uma das unidades de geração, as GDs deveriam ser controladas apenas por variáveis que possam ser medidas localmente, não sendo desejável que haja sistemas de comunicação (GUERRERO et al., 2013a; XIA; PENG; WEI, 2017; DÍAZ; VASQUEZ; GUERRERO, 2018). Alguns autores consideraram a exploração da operação cooperativa entre as GDs, tendo uma estrutura de comunicação entre as GDs vizinhas para compartilhamento das cargas e operação sem desvios (SHAFIEE et al., 2014; NASIRIAN et al., 2015; GAO; AI, 2018). Trabalhos recentes têm explorado técnicas de inteligência artificial para controlar a GD utilizando variáveis locais (sem sistemas de comunicação entre as GDs) (BEVRANI; SHOKOOHI, 2013; BIDRAM; LEWIS; DAVOUDI, 2014; DÍAZ et al., 2014; OLIVARES et al., 2014; WANG; HU; CHEN, 2014; AHMADI; SHOKOOHI; BEVRANI, 2015; XIA; PENG; WEI, 2017).

A lógica fuzzy é utilizada em alguns trabalhos devido à sua capacidade de gerenciar diferentes variáveis simultaneamente e à sua simplicidade de condensar algoritmos complexos (SANJARI; GHAREHPETIAN, 2013; BEVRANI; SHOKOOHI, 2013; WANG; HU; CHEN, 2014; DÍAZ et al., 2014; AHMADI; SHOKOOHI; BEVRANI, 2015; ANDALIB-BIN-KARIM; LIANG; ZHANG, 2017). Delghavi e Yazdani (2012) propuseram um controlador descentralizado baseado nos controladores *droop* que permite às GDs compartilharem carga entre elas quando a MR opera isolada e que controlem a potência gerada quando a microrrede está conectada à RD. Entretanto, quando a MR opera em modo isolado, não há um controlador que minimize ou elimine os desvios causados pelos controladores *droop*, tornando a frequência e a tensão dependentes das cargas locais. Em Bevrani e Shokoohi (2013), os autores utilizaram um ajuste neuro-fuzzy para modelar o controlador *droop* e reduzir os

Figura 1.2: Hierarquia e funções dos controladores de uma microrrede, adaptado de Bidram e Davoudi (2012).



Fonte: Acervo pessoal.

desvios causado pela dependência da potência fornecida pela GD. Porém, a MR opera isolada e não é conectada à RD. Wang, Hu e Chen (2014) utilizaram lógica fuzzy para ajustar os parâmetros do *droop* de tensão de uma GD. A GD opera de modo isolado e tem respostas mais rápidas quando utiliza o controlador com ajuste por lógica fuzzy, mas não possui um controlador secundário para corrigir os desvios. Em outro trabalho, a lógica fuzzy é utilizada para alterar uma impedância virtual vista pela GD, variando a corrente de carga e descarga de um conjunto de baterias distribuído, sem utilizar um sistema de

comunicação entre as GDs da MR (DÍAZ et al., 2014). Entretanto, a estratégia utilizada para este trabalho é aplicado para microrredes CC.

Em Ahmadi, Shokoohi e Bevrani (2015) foi proposta uma aplicação de lógica fuzzy para ajustar os parâmetros dos controladores *droop* e fazer compensações nas impedâncias de linha da MR, melhorando o desempenho dos controladores durante transitórios. Contudo, a MR opera isolada da RD e sem um controlador para minimizar ou eliminar os desvios causados pelos controladores *droop*. Já Sanjari e Gharehpetian (2013) propuseram um controlador secundário fuzzy para eliminar os desvios de tensão/frequência e permitir o compartilhamento de cargas entre as GDs. Porém, todas as GDs se comunicam através de um sistema de comunicação, o que aumenta os custos de instalação e manutenção da MR. Uma proposta de controlador fuzzy secundário também foi feita em (ANDALIB-BIN-KARIM; LIANG; ZHANG, 2017). Todavia, o controlador proposto melhorou a resposta transitória durante distúrbios quando comparado ao controlador secundário convencional, mas necessita o chaveamento das variáveis quando quer controlar a potência injetada na RD, ou seja, os controladores mudam dependendo do modo de operação da MR.

Portanto, esta tese está inserida no contexto de microrredes autônomas, tendo em vista a flexibilidade das microrredes CA em operar conectada ou isolada da rede de distribuição e com o compartilhamento de cargas entre as GDs que compõem a MR, empregando lógica fuzzy no controle de sua operação. A expressão multitarefas é utilizada para deixar evidente que a contribuição deste trabalho deve ser capaz de regular variáveis de controle conflitantes sem chaveamento (frequência/potência ativa e tensão/potência reativa), com a aplicação da lógica fuzzy. O escopo deste trabalho se restringe a dois tipos de GDs, as baseadas em máquinas síncronas e as baseadas em conversores CC-CA.

Esta tese propõe um controlador secundário multitarefa fuzzy (CSF) para gerenciar uma microrrede CA que utiliza controladores *droop* em seu nível primário. Ademais, propõe eliminar o chaveamento entre a camada de controle secundário e terciário através da utilização da lógica fuzzy para realizar esta operação em modo multitarefa, seja conectado à rede de distribuição ou isolado, reduzindo os *links* de comunicação entre as camadas hierárquicas na estrutura de controle. Como objetivos específicos é possível apontar:

- ❑ Investigar formas de operar as microrredes, de maneira eficiente e autônoma, para que as fontes possam operar com menor dependência do sistema de comunicação.
- ❑ Propor um controlador secundário, empregando lógica fuzzy, que seja capaz de manter a operação de MRs no modo isolado ou conectado à RD, através do gerenciamento de múltiplas entradas, respeitando as particularidades de cada GD.
- ❑ Avaliar o comportamento da GD e a viabilidade de um CSF em simulações e ensaios experimentais de casos típicos de operação da MR.
- ❑ Analisar a estabilidade da MR empregando o CSF para fins de validação da proposta.

A tese está organizada como segue. No Capítulo 2, seguindo desta introdução, uma revisão dos modos de operação da microrrede CA é apresentado, assim como as GDs que serão exploradas neste trabalho, os controladores *droop* e a estrutura do controlador hierárquico convencional. A proposta do CSF é mostrada no Capítulo 3, na qual também é mostrado como a estabilidade da microrrede utilizando o controlador proposto foi analisada. O Capítulo 4 apresenta resultados de simulação para as MRs baseadas em conversores CC-CA e baseadas em geradores síncronos. A sintonia dos controladores primários, secundários e terciários são apresentados ainda no Capítulo 4, assim como os resultados da análise de estabilidade do CSF. Resultados experimentais obtidos para a MR baseada em conversores CC-CA são apresentados no Capítulo 5.

Os resultados de simulação mostrados no Capítulo 4 foram publicados e apresentados em conferências como *European Control Conference* e *Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON)* (AGNOLETTO et al., 2016; NEVES et al., 2016). Os resultados experimentais com a microrrede baseada em conversores CC-CA e a análise de estabilidade fazem parte da publicação na *IEEE Transaction on Smart Grid* (NEVES et al., 2019), ilustrando a operação do controlador multitarefa proposto.

Microrredes CA

As microrredes devem ser capazes de resolver localmente problemas de energia e aumentar a flexibilidade do sistema elétrico de potência, uma vez que são elementos-chaves para integrar fontes de energia renováveis e distribuídas. As microrredes permitem que a geração de energia esteja próxima dos consumidores, através da utilização de tecnologia digital para controlar aplicações nas casas dos consumidores, economizar energia, reduzir custos e aumentar a confiança e transparência do sistema (GUERRERO et al., 2013a). Por isso, estratégias de controle têm sido utilizadas para melhorar a qualidade da energia fornecida, aumentar a estabilidade da microrrede perante a distúrbios de variações de cargas ou eventos como desconexão da rede.

A Figura 1.1 mostrou uma configuração comum de uma microrrede com fontes de energias providas de recursos renováveis e não-renováveis. Nesta microrrede, a conexão do barramento CC ao barramento CA é feita através do uso de um inversor de potência para condicionar a energia de corrente contínua para corrente alternada. Entretanto, o gerador diesel já produz a energia em corrente alternada. Ou seja, as GDs devem ser integradas na microrrede com estratégias para que não haja conflitos entre suas respectivas malhas de controle.

2.1 Operação da microrrede CA

As GDs que formam uma microrrede CA, conjunto de GDs e cargas que operam em corrente alternada, devem operar de maneira estável e fornecer energia de qualidade ao consumidor. Desta maneira, as malhas de controle precisam regular adequadamente as variáveis de interesse durante o funcionamento da GD. Cada sistema de geração tem sua particularidade para controlar as variáveis responsáveis pela disponibilidade e qualidade da energia gerada. As GDs escolhidas para compor a microrrede abordada neste trabalho são as baseadas em geradores síncronos, mais especificamente a movida por um motor diesel, e GDs baseadas em conversores CC-CA, que utilizam do barramento CC formado por fontes renováveis para fornecer potência ao barramento CA. As características destas

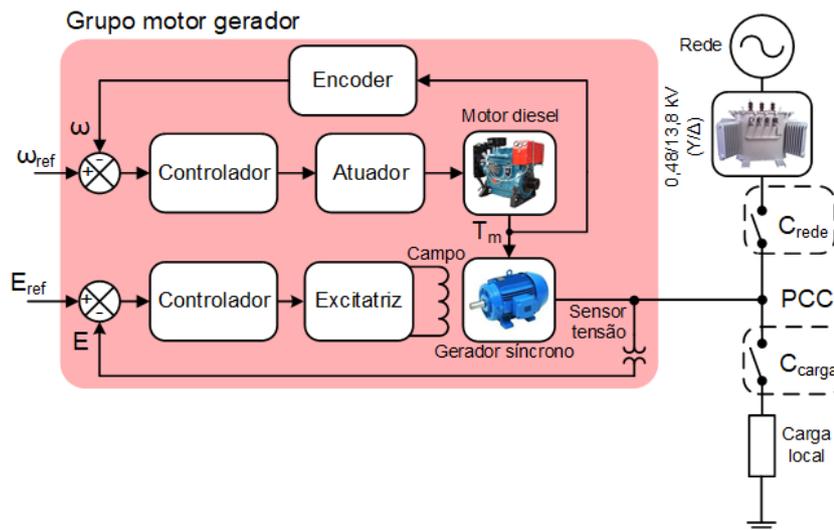
GDs são descritas a seguir, assim como suas malhas de controle e estratégias para que operem conectada a um ponto de conexão comum.

2.1.1 Geração distribuída baseada em máquina síncrona

Uma GD baseada em máquina síncrona é composta por um gerador síncrono e um sistema que converte energia (química, térmica, potencial ou cinética) em energia mecânica. Esse sistema pode ser uma turbina a vapor, uma turbina hidráulica, um motor diesel, entre outros.

A Figura 2.1 apresenta uma configuração de GD composta por um gerador síncrono e um motor diesel, formando um grupo motor gerador diesel (GMG). O GMG está conectado à carga local e à RD através do PCC e das chaves C_{rede} e C_{carga} , respectivamente. A malha de controle de frequência do GMG recebe o sinal de frequência (ω), lido por um

Figura 2.1: Diagrama de uma GD composta por um GMG, adaptado de Reis et al. (2014).



Fonte: Acervo pessoal.

encoder posicionado no eixo do motor diesel, e um valor de referência de frequência (ω_{ref}). O controlador de frequência repassa o sinal de controle para o atuador do motor diesel, abrindo ou fechando a válvula de combustível, de acordo com a demanda de torque do gerador síncrono. A malha de controle de tensão recebe a tensão medida nos terminais do gerador síncrono (E) e o sinal de referência de tensão (E_{ref}) e atua no gerador através da excitatriz e do enrolamento de campo. A GD opera com a malha de controle de tensão e frequência se estiver no modo isolado, ou seja, sem a presença da RD (REIS et al., 2014).

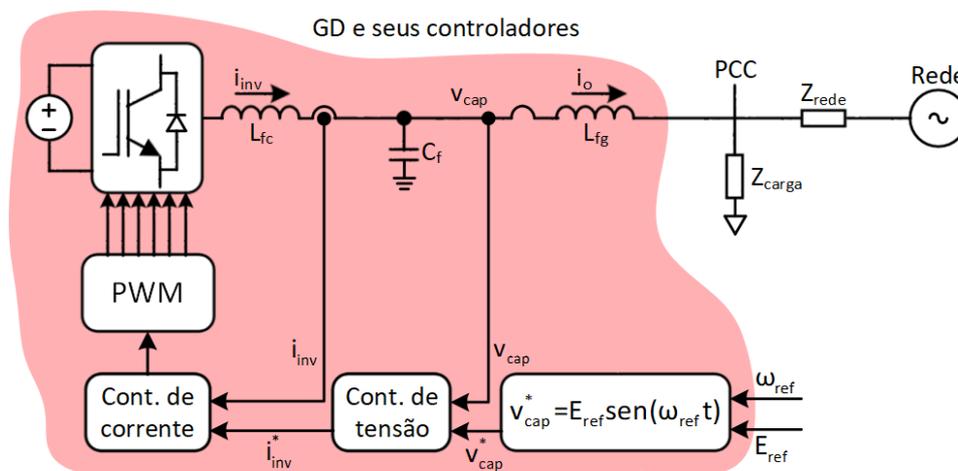
Se a GD estiver operando de modo conectado à RD, o GMG deve controlar a potência ativa e reativa que está fornecendo ao PCC. A partir das medições de tensão e corrente nos terminais do gerador, as potências ativa e reativa devem ser calculadas e os controladores de potência devem comparar os sinais medidos com os sinais de referência. O

controle de potência ativa é feito através do torque mecânico T_m e o controle de potência reativa é realizado pela excitatriz conectada ao enrolamento de campo do gerador síncrono (AGNOLETTO et al., 2014; NEVES et al., 2015).

2.1.2 Geração distribuída baseada em conversores CC-CA

A Figura 2.2 apresenta o diagrama geral de uma GD baseada em um conversor CC-CA. O bloco conectado à esquerda do conversor pode ser uma bateria ou um barramento CC em que fontes renováveis estão conectadas. O conversor CC-CA chaveia a tensão CC em níveis positivos e negativos para inverter a tensão para CA, através da ponte de IGBTs. O filtro LC de saída filtra as componentes de altas frequências providas de uma ponte de IGBTs. O indutor de acoplamento L_{fg} conecta a GD ao PCC e a impedância Z_{rede} à RD. A partir das referências ω_{ref} e E_{ref} , é sintetizado o sinal de tensão v_{cap}^* que servirá

Figura 2.2: Diagrama geral do conversor conectado com a GD e seus controladores de tensão e corrente, adaptado de Rocabert et al. (2012).



Fonte: Acervo pessoal.

como referência para o controlador de tensão. As medições de tensão v_{cap} e a corrente i_{inv} são enviadas aos controladores de tensão e corrente. O controlador de tensão repassa a referência de corrente i_{inv}^* para o controlador de corrente, que por sua vez, controla a corrente de saída através dos PWMs de acionamento das chaves IGBTs do conversor CC-CA.

Conectar uma GD à uma MR requer um estudo prévio sobre o seu modo de controle. Do ponto de vista prático, o controle de frequência pode ser isócrono, com a referência de velocidade constante, ou em *droop*, com a referência de frequência variável de acordo com o carregamento da MR (RASHID, 2013). Do mesmo modo, o controle de tensão também pode ser isócrono ou em *droop*. O controle isócrono não permite o compartilhamento de potência, pois a GD fornecerá a potência necessária para que a MR opere de acordo com os

valores de referência de tensão e frequência. Por outro lado, o controlador *droop* permite que as GDs compartilhem a carga local ou a potência total fornecida pela MR (KUNDUR, 1994).

2.1.3 Associação de fontes em paralelo e conexão com a rede

A associação de fontes em paralelo requer estratégias de controle para manter a estabilidade da microrrede, podendo ser de forma centralizada ou descentralizada (KUNDUR, 1994; RASHID, 2013; GUERRERO et al., 2013a; GUERRERO et al., 2013b).

As estratégias centralizadas são feitas através de *links* de comunicação entre as GDs e o controlador central. A comunicação deve ser feita em banda larga e regular a GD em tempo real. Entretanto, estes tipos de estratégias são custosas por causa da estrutura de comunicação e a manutenção destes *links* (DÍAZ et al., 2014; DÍAZ; VASQUEZ; GUERRERO, 2018).

As estratégias de controle descentralizadas são feitas sem os *links* de comunicação. Uma estratégia comum de gerenciamento é a mestre-escravo, na qual uma das GDs, ou a rede, faz o papel de controlar a tensão e a frequência no barramento de conexão e as outras GDs fazem o controle da potência injetada (KUNDUR, 1994; RASHID, 2013; ANDALIB-BINKARIM; LIANG; ZHANG, 2017). Apesar de ser uma estrutura descentralizada, as GDs que controlam a potência injetada, escravos, são dependentes da fonte que controla a frequência e a tensão do PCC, mestre. Além disso, não há compartilhamento de carga entre estas fontes, sendo o mestre responsável por fornecer a diferença entre as potências geradas pelas GDs escravas e a consumida pelas cargas. Se a fonte mestre não for capaz de receber o excesso de potência gerada, a potência gerada pelas GDs escravas deve ser reduzida ou mecanismos de proteção devem fazer a desconexão das GDs. Uma alternativa descentralizada para compartilhar a carga entre as GDs tornando-as independentes umas das outras é utilizar os controladores *droop* (XIA et al., 2018).

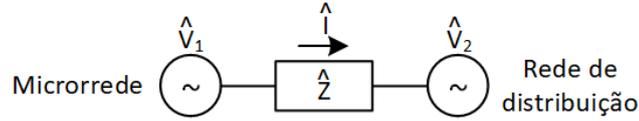
2.2 Controladores *droop*

A estratégia de controle em *droop* é amplamente utilizada por sistemas de geração que compartilham cargas. Seja de pequeno ou grande porte, quando há uma GD operando em paralelo com outra fonte, cada sistema assume uma parte da carga.

Os controladores *droop* operam alterando a tensão e a frequência de referência para os controladores da GD. Esses valores de referência são alterados a partir de partes proporcionais às potências ativa e reativa fornecida pela GD. A implementação dos controladores *droop* pode ser feita após um estudo prévio do tipo de impedância predominante na microrrede.

Considere a configuração de GDs apresentada na Fig. 2.3. Os controladores *droop* vão agir sobre cada uma das GDs e procurar um ponto de operação comum através da

Figura 2.3: Circuito equivalente monofásico de duas GDs conectadas através de uma impedância.



Fonte: Acervo pessoal.

mudança dos níveis de tensão e frequência de referência que as GDs estão operando. Desta forma, cada uma das GDs injetam uma quantidade relativa de potência proporcional ao coeficiente de *droop* configurado.

Dada a conexão exibida na Fig. 2.3, as tensões, correntes e impedâncias são definidas por:

$$\hat{V}_1 = |V_1|e^{j\theta_1} \quad (2.1)$$

$$\hat{V}_2 = |V_2|e^{j\theta_2} \quad (2.2)$$

$$\hat{Z} = |Z|e^{j\phi} \quad (2.3)$$

$$\begin{aligned} \hat{I} &= (\hat{V}_1 - \hat{V}_2)/\hat{Z} \\ &= \frac{|V_1|e^{j\theta_1} - |V_2|e^{j\theta_2}}{|Z|e^{j\phi}} \\ &= \frac{|V_1|}{|Z|}e^{j(\theta_1-\phi)} - \frac{|V_2|}{|Z|}e^{j(\theta_2-\phi)} \end{aligned} \quad (2.4)$$

nos quais o índice “chapéu” significa a forma fasorial, $|V_1|$ e θ_1 são o módulo e o ângulo da tensão da GD 1, respectivamente, e $|V_2|$ e θ_2 , da GD 2. A corrente \hat{I} flui através da impedância \hat{Z} , que conecta as GDs. O ângulo ϕ é a fase da impedância de \hat{Z} .

A potência fornecida pela GD 1 é dada por:

$$\begin{aligned} S &= P + jQ = \hat{V}_1\hat{I}^* \\ &= \hat{V}_1 \left(\frac{|V_1|}{|Z|}e^{j(\theta_1-\phi)} - \frac{|V_2|}{|Z|}e^{j(\theta_2-\phi)} \right)^* \\ &= |V_1|e^{j\theta_1} \left(\frac{|V_1|}{|Z|}e^{-j(\theta_1-\phi)} - \frac{|V_2|}{|Z|}e^{-j(\theta_2-\phi)} \right) \\ &= \frac{|V_1|^2}{|Z|}e^{j\phi} - \frac{|V_1||V_2|}{|Z|}e^{j(\theta_1-\theta_2+\phi)} \end{aligned} \quad (2.5)$$

na qual S é a potência aparente, P é a potência ativa e Q , a reativa. Utilizando a fórmula de Euler, que relaciona números complexos a relações trigonométricas, e atribuindo P e Q como sendo parte real e imaginária de S , respectivamente, tem-se:

$$P = \frac{|V_1|^2}{|Z|}\cos(\phi) - \frac{|V_1||V_2|}{|Z|}\cos(\theta_1 - \theta_2 + \phi) \quad (2.6)$$

$$Q = \frac{|V_1|^2}{|Z|}\sen(\phi) - \frac{|V_1||V_2|}{|Z|}\sen(\theta_1 - \theta_2 + \phi). \quad (2.7)$$

A partir daqui, algumas considerações podem ser feitas, dependendo das características da rede e da microrrede. A impedância Z depende da natureza de sua linha, impactando no modo em que a potência flui de uma GD para outra. A impedância pode ser resistiva, indutiva, capacitiva ou uma combinação entre resistiva e indutiva/capacitiva. Além do módulo, a fase imposta pela impedância (ϕ) muda de acordo com o valor resistivo R e a reatância X , como pode ser visto na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Variação da impedância em relação à R e X ($\delta = \theta_1 - \theta_2$).

Z	$ Z $	ϕ	$P \propto$	$Q \propto$
R	R	0°	$ V_1 - V_2 $	$-\delta$
jX	X	90°	δ	$ V_1 - V_2 $
$-jX$	X	-90°	$-\delta$	$-(V_1 - V_2)$
$R+jX$	$\sqrt{R^2 + X^2}$	$tg^{-1}(X/R)$	$ V_1 R - V_2 (R + \delta X)$	$ V_1 X - V_2 (\delta R - X)$
$R-jX$	$\sqrt{R^2 + X^2}$	$-tg^{-1}(X/R)$	$ V_1 R - V_2 (R - \delta X)$	$ V_1 X - V_2 (\delta R + X)$

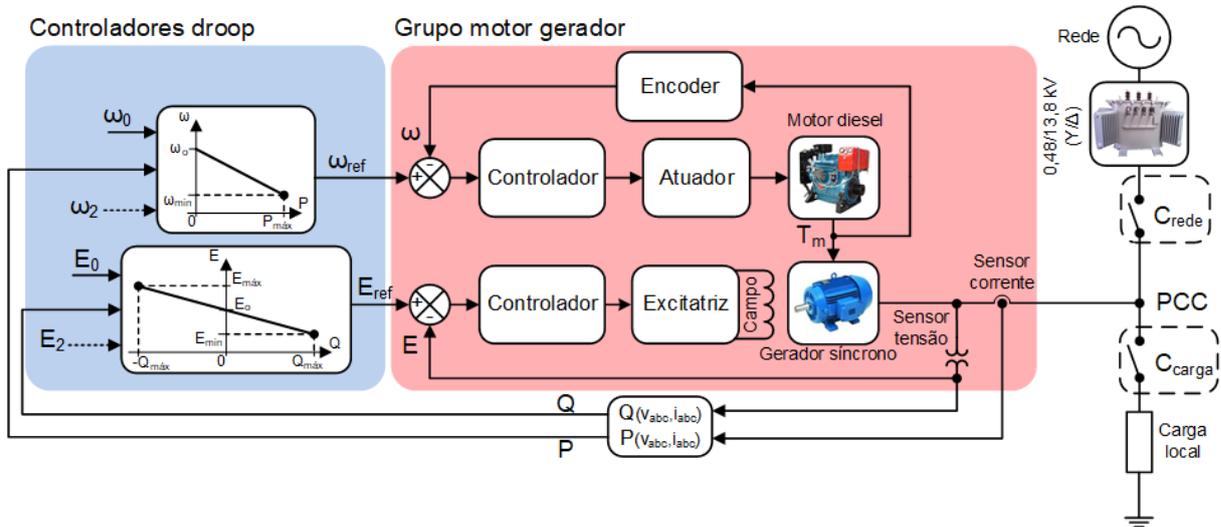
Uma MR CC possui impedância de natureza resistiva em suas linhas (JIN et al., 2018). Uma MR CA pode possuir diferentes naturezas nas impedâncias de linha, dependendo de seu tamanho e configuração. Contudo, a impedância da rede considerada nesta tese será predominantemente indutiva, para efeito de simplificação do desenvolvimento do controlador proposto. Esta consideração implica que $|Z| = X$ e $\phi = 90^\circ$ e as potências ativa e reativa serão proporcionais a δ e $|V_1| - |V_2|$, respectivamente, como mostrado na Tabela 2.1. Sendo assim, o controlador *droop* de frequência altera a frequência de referência através de uma parcela proporcional à P e o controlador *droop* de tensão, proporcional à Q .

As Figuras 2.4 e 2.5 mostram a localização em que os controladores *droop* devem ser implementados para aplicar esta estratégia de controle. A partir das potências médias fornecidas pelas GDs, é somada uma parcela nas referências de frequência e de tensão. As relações entre a potência ativa e reativa, frequência e tensão são apresentadas na Fig. 2.6. A curva $P-\omega$, exibida na Fig. 2.6a, relaciona a potência ativa com a frequência que a GD deve operar. O mesmo acontece com a tensão e a potência reativa, curva $Q-E$ exibida na Fig. 2.6b, que repassa a amplitude da tensão de referência de acordo com o ponto de operação da potência reativa. Se a GD estiver operando de modo isolado, as relações entre os valores de entrada e saída são dadas por:

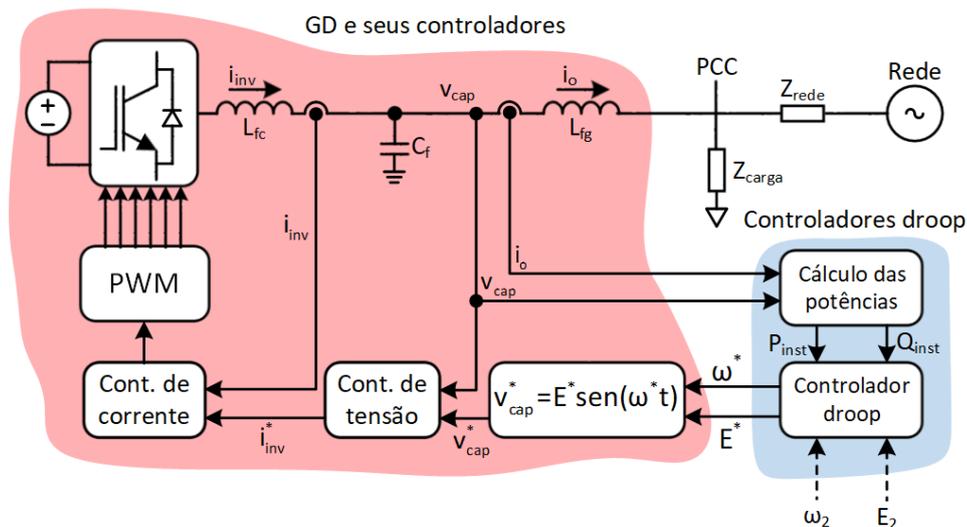
$$\omega_A = \omega_o - m(P_A - P_o) \quad (2.8)$$

$$E_A = E_o - n(Q_A - Q_o) \quad (2.9)$$

no qual ω_o é a frequência de operação para o ponto de operação de potência ativa $P_o = 0$ e E_o é a tensão para o ponto de operação de potência reativa $Q_o = 0$. As constantes m e n relacionam as variações das potências com os valores de ω_o e E_o , resultando em

Figura 2.4: Diagrama de uma GD composta por um GMG, com controle em *droop*.

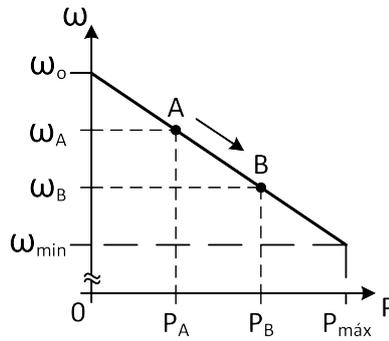
Fonte: Acervo pessoal.

Figura 2.5: Diagrama geral do conversor conectado com a GD, seus controladores e os controladores *droop*.

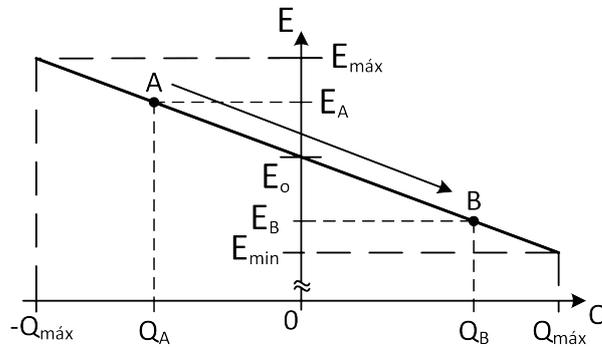
Fonte: Acervo pessoal.

valores de referência de frequência e tensão ω_A e E_A , respectivamente. Os valores de m e n caracterizam as curvas do controle em *droop*, nos quais são dados em porcentagem e nomeiam o *droop*, por exemplo: “Controle de frequência em *droop* de 5%”, valor típico para a inclinação do *droop* de frequência para geradores síncronos (KUNDUR, 1994). Um coeficiente *droop* de 5% significa que para uma variação de 0 a 100% da potência fornecida pela GD, a variável controlada será alterada em 5%. As GDs baseadas em conversores CC-CA operam com valor típico de inclinação menores do que 5%, por questões de estabilidade do paralelismo (NEVES et al., 2016; XIA; PENG; WEI, 2017; DÍAZ; VASQUEZ; GUERRERO,

Figura 2.6: Relação entre a (a) frequência com a potência ativa e a (b) tensão com a potência reativa empregada nas GD da microrrede.



(a) Curva P- ω .



(b) Curva Q-E.

Fonte: Acervo pessoal.

2018).

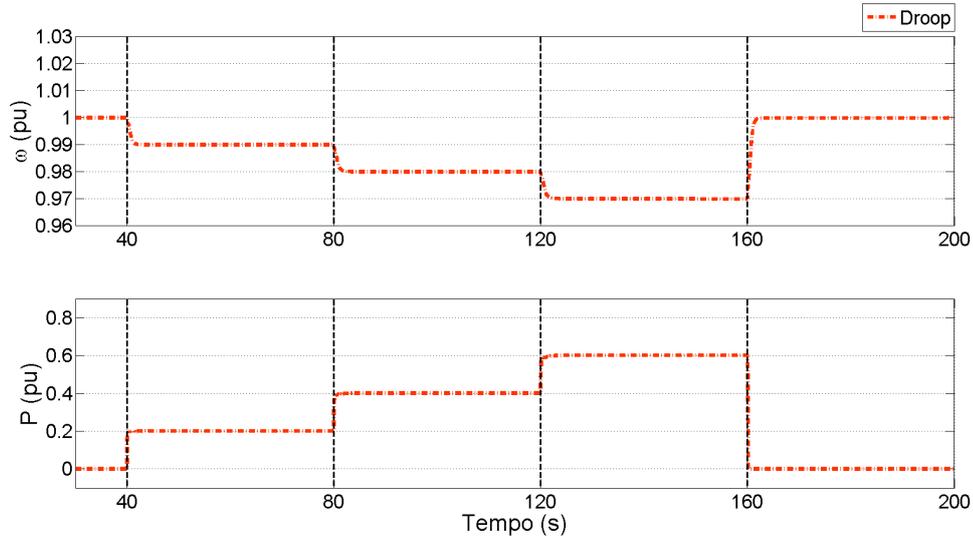
Quando outra carga local é conectada à MR, o ponto de operação muda (de A para B), alterando a frequência e a tensão controlada pela GD. A mudança de A para B resulta em uma variação de frequência dada por:

$$\begin{aligned}\Delta\omega_{BA} &= \omega_B - \omega_A = -m(P_B - P_o) + m(P_A - P_o) \\ \Delta\omega_{BA} &= -m(P_B - P_A),\end{aligned}\tag{2.10}$$

na qual $\Delta\omega_{BA}$ é a variação da frequência na MR causada pela conexão da nova carga. De maneira semelhante, a variação no ponto de operação da tensão é dada por:

$$\begin{aligned}\Delta E_{BA} &= E_B - E_A = -n(Q_B - Q_o) + n(Q_A - Q_o) \\ \Delta E_{BA} &= -n(Q_B - Q_A).\end{aligned}\tag{2.11}$$

O efeito da estratégia utilizando controlador *droop* é ilustrado na Fig. 2.7. Considerando um GMG como GD, a cada conexão de carga (40 s, 80 s e 120 s), a referência de frequência é diminuída. Aos 160 s, as cargas locais são retiradas e a MR volta a operar com valor nominal de frequência.

Figura 2.7: Efeito do erro de regime causado pela operação com controle em *droop*.

Fonte: Acervo pessoal.

Por outro lado, se a MR estiver conectada à rede de distribuição, a potência que o GMG fornece vai depender da frequência e da tensão imposta pela RD. Observando a Fig. 2.6, as relações as potências fornecidas pelo GMG são dadas por:

$$P_A = P_o + (\omega_o - \omega_A)/m \quad (2.12)$$

e

$$Q_A = Q_o + (E_o - E_A)/n. \quad (2.13)$$

Assim, com a utilização do controlador *droop*, a frequência e a tensão da MR operando de modo isolada, dependem da potência das cargas locais e a potência gerada pela GD, no modo conectado à rede de distribuição, depende da frequência e da tensão impostas pela RD no PCC (QUESADA et al., 2014). Ainda, em ambos os modos de operação, todas as variáveis dependem dos parâmetros de configuração do controle em *droop* (NUTKANI et al., 2015).

A vantagem do compartilhamento de cargas em uma MR por conta dos controladores *droop* é equacionada a seguir. Em uma MR com GD₁ e GD₂, as equações dos *droops* são dadas por:

$$\omega_{GD_1} = \omega_{oGD_1} - m(P_{GD_1} - P_{oGD_1}) \quad (2.14)$$

$$E_{GD_1} = E_{oGD_1} - n(Q_{GD_1} - Q_{oGD_1}) \quad (2.15)$$

e

$$\omega_{GD_2} = \omega_{oGD_2} - m(P_{GD_2} - P_{oGD_2}) \quad (2.16)$$

$$E_{GD_2} = E_{oGD_2} - n(Q_{GD_2} - Q_{oGD_2}). \quad (2.17)$$

As GDs estarão conectadas no PCC fazendo com que $\omega_{GD_1} = \omega_{GD_2}$ e $E_{GD_1} = E_{GD_2}$. Assim, a potência que cada uma das GDs fornecerá depende dos valores P_o , Q_o , ω_o , E_o , m e n dos controladores *droop* de cada uma. Se os parâmetros dos controladores *droop* das GDs forem os mesmos, as potências (P_{GD_1}, Q_{GD_1}) e (P_{GD_2}, Q_{GD_2}) também serão as mesmas, para satisfazer as igualdades

$$\omega_{o_{GD_1}} - m(P_{GD_1} - P_{o_{GD_1}}) = \omega_{o_{GD_2}} - m(P_{GD_2} - P_{o_{GD_2}}) \quad (2.18)$$

$$E_{o_{GD_1}} - n(Q_{GD_1} - Q_{o_{GD_1}}) = E_{o_{GD_2}} - n(Q_{GD_2} - Q_{o_{GD_2}}). \quad (2.19)$$

Se qualquer um dos parâmetros for diferente, outro ponto de equilíbrio será determinado pelos controladores *droop*. Conseqüentemente, alteração na potência demandada pela carga da MR resultará em um novo ponto de operação, evidenciando o erro de regime provocado pela dependência da potência da carga, como mostrado em (2.10) e (2.11).

Os desvios de frequência e tensão devem ser corrigidos para que a microrrede passe a operar em condições nominais. Entretanto, os controladores *droop* não conseguem corrigir estes desvios enquanto operam sozinhos. Um controle secundário deve ser instalado para corrigir os desvios.

2.3 Hierarquia dos controladores

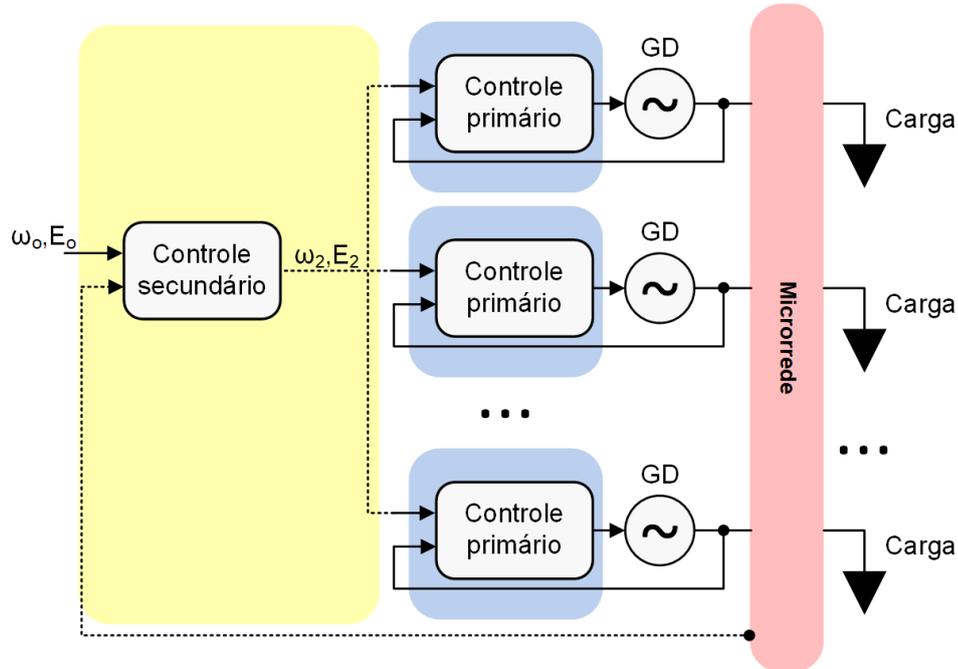
A estrutura de controle hierárquico é formada por controladores secundários e controladores terciários (GUERRERO et al., 2013a). Os controladores secundários são empregados com o principal objetivo de sanar a desvantagem dos desvios causados pelos controladores *droop*. Já os controladores terciários contribuem para possibilitar a conexão da microrrede com a rede, controlando a potência injetada pelas GDs na RD.

2.3.1 Controle secundário

Para que a microrrede volte a operar com valores nominais de frequência e tensão, as GDs devem fornecer mais, ou menos, potência, dependendo do ponto de operação após eventos de entrada ou saída de cargas. A Figura 2.8 mostra como o controlador secundário atua sobre a microrrede e suas GDs. A partir das medições no PCC, *links* de comunicação (linhas tracejadas na Fig. 2.8) levam a informação para as malhas de controle secundário. Por sua vez, os controladores secundários enviam os sinais ω_2 e E_2 para os controladores primários. A Figura 2.9 mostra o diagrama do controlador secundário convencional.

As parcelas ω_2 e E_2 são dadas por controladores tipo proporcional integral (PI) que monitoram os desvios de frequência e tensão (SHAFIEE et al., 2014). Enquanto a chave C_1 estiver aberta, a MR opera de modo isolado da rede e o controlador secundário tem como referências os termos ω_o e E_o , que são normalmente configurados como 1 pu, valores nominais de operação da microrrede. Quando opera de modo conectado à rede, o controlador secundário recebe os sinais do controlador terciário, ω_3 e E_3 , que serão detalhados

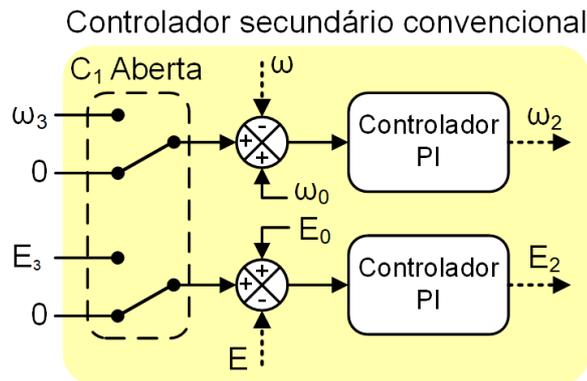
Figura 2.8: Hierarquia de controle para operação a microrrede operando de modo isolado, adaptado de Olivares et al. (2014). As linhas tracejadas representam os sistema de Comunicação para levar a informação do PCC para o controle secundário e do controle secundário para os controles primários.



Fonte: Acervo pessoal.

a seguir. A Figura 2.10 mostra como o controle secundário atua sobre os controladores

Figura 2.9: Diagrama do controlador secundário.

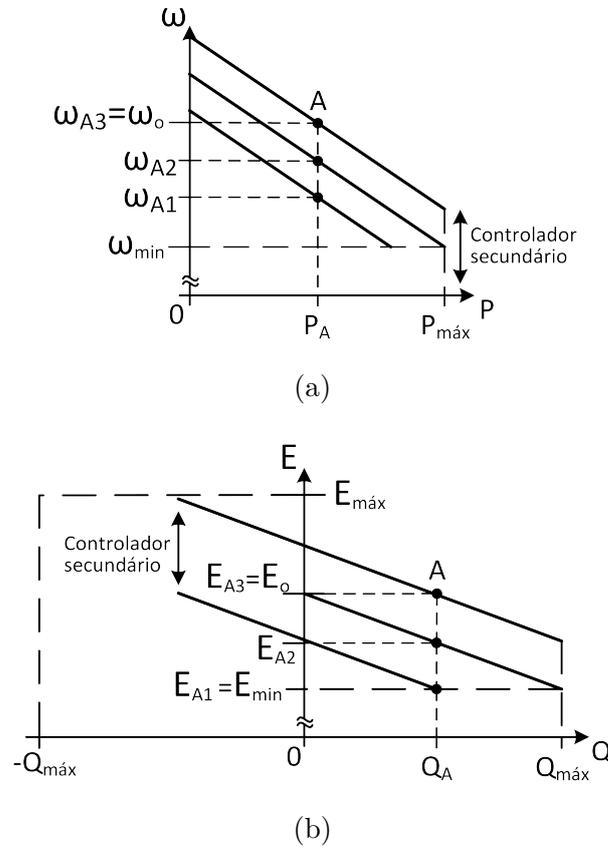


Fonte: Acervo pessoal.

droop da GD. O controlador secundário atua sobre os controladores *droop* através do deslocamento da curva do *droop*, para cima ou para baixo. A mudança do ponto de operação para A1, A2 ou A3 é dada por:

$$\omega_{A1} = \omega_o - m(P_{A1} - P_o) + \omega_2 \quad (2.20)$$

$$E_{A1} = E_o - n(Q_{A1} - Q_o) + E_2 \quad (2.21)$$

Figura 2.10: Atuação do controlador secundário nos controladores *droop*.

Fonte: Acervo pessoal.

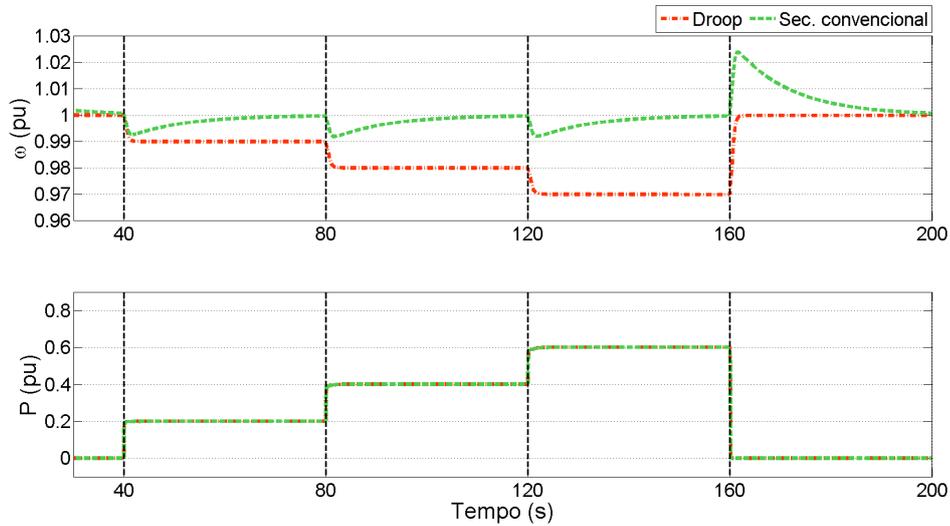
nos quais os termos ω_2 e E_2 são as parcelas dadas pelo controle secundário, que serão somadas às referências de frequência e tensão, como mostrado nas Figs. 2.4 e 2.5.

O nível de controle secundário é o nível mais alto na operação da microrrede em modo isolado e atua de forma mais lenta do que o controle primário com a intenção de desacoplar a atitude entre o controle secundário e primário, com atitudes mais lentas do que os controladores primários; reduzir a banda de comunicação utilizando medidas amostradas da microrrede; e permitir que o controle secundário execute cálculos complexos (OLIVARES et al., 2014). A Figura 2.11 exibe a atuação do controlador secundário convencional de frequência na correção dos desvios causados por entradas de cargas (40 s, 80 s e 120 s) e pela saída das cargas (160 s) da MR.

2.3.2 Controle terciário

Quando a microrrede está operando em modo conectado com a rede, o fluxo de potência pode ser controlado, ajustando a frequência e a tensão dentro da microrrede, por meio dos ajustes da diferença dos módulos e do ângulo de defasagem das tensões do PCC e da rede. Essa coordenação é feita através dos controladores terciário que, além de coordenar

Figura 2.11: Controlador secundário convencional corrigindo o desvio de frequência causado pelo controlador *droop*.



Fonte: Acervo pessoal.

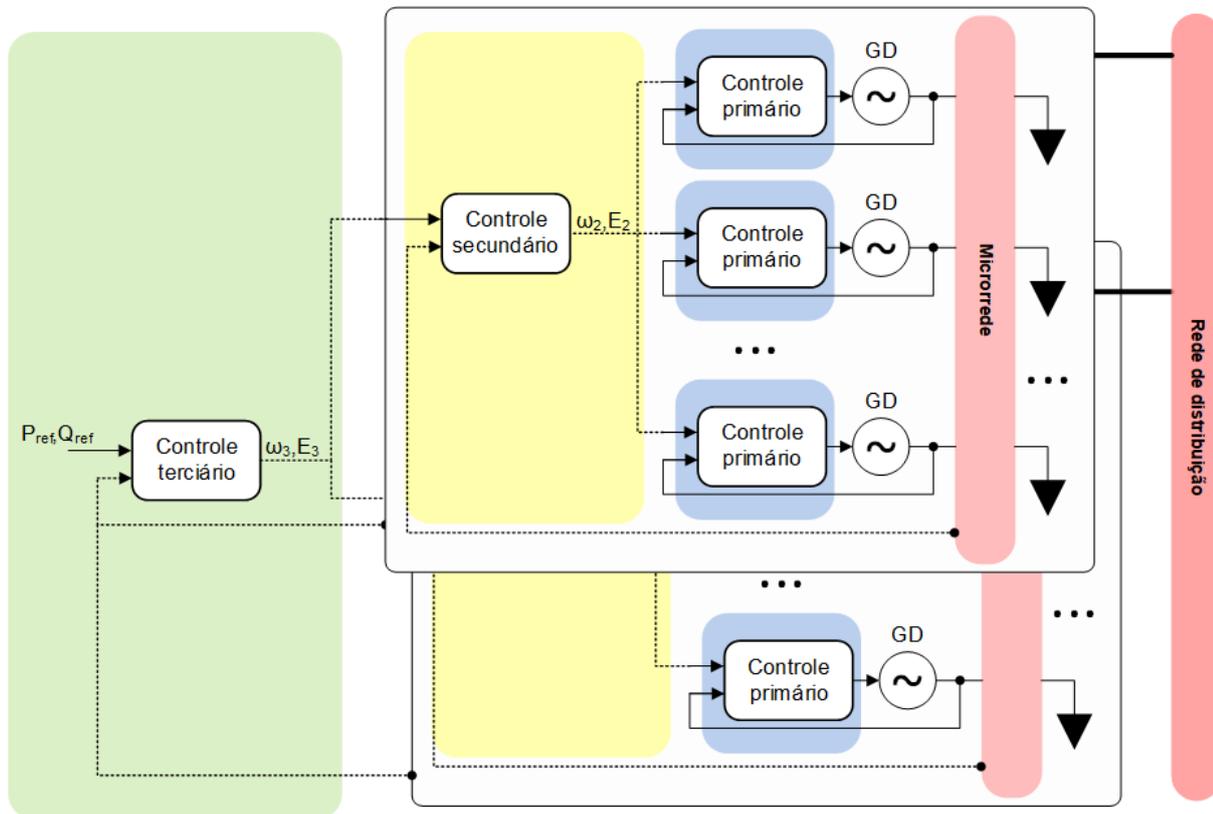
a quantidade de potência que cada MR fornece à RD, pode fazer a otimização dos recursos da microrrede, através de, por exemplo, estratégias de otimização de custo (GUERRERO et al., 2013a).

O controlador terciário é a camada de controle mais alta utilizando a hierarquia de controladores e é responsável por integrar os controladores secundários das microrredes operando em paralelo ou operando conectada à RD. A Figura 2.12 mostra as três camadas da hierarquia dos controladores. Uma vez definida a potência que cada microrrede deve gerar, o controlador terciário envia as referências de frequência e tensão para as camadas de controle secundário. Os controladores secundários coordenam a frequência e a tensão dentro de cada microrrede, atuando sobre os controladores primários (OLIVARES et al., 2014). A partir da medição das potências fornecidas pela MR e as potências de referência, o controlador terciário passa os sinais ω_3 e E_3 para o controlador secundário através de *links* de comunicação. A Figura 2.13 apresenta o diagrama do controlador terciário.

Os sinais ω_3 e E_3 transladam as curvas dos controladores *droop*, atuando através dos controladores secundários. Entretanto, a frequência e a tensão do PCC é regulada pela RD, fazendo com que as GDs alterem os pontos de operação de potências ativa e reativa. A Figura 2.14 exhibe a atuação do controlador terciário sobre os controladores *droop*. A movimentação das curvas dos controladores *droop* são feitas de acordo com as potências de referência do controlador terciário.

A atuação do controlador terciário para o controle da potência gerada pela microrrede é exibida na Fig. 2.15. A MR é conectada à rede aos 30 s e inicia a exportação de potência com referência de $0,35 + j0,20$ pu. Aos 90 s, as referências de potência dobram para $0,70 + j0,40$ pu e, aos 150 s, são reduzidas novamente para o valor inicial.

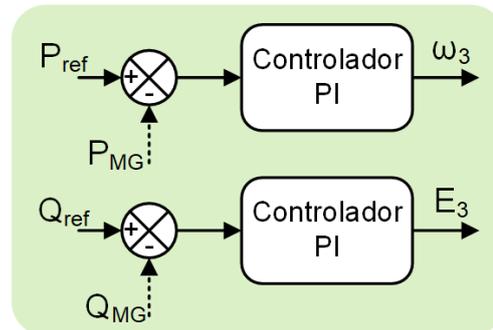
Figura 2.12: Hierarquia de controle para a microrrede operando de modo conectado, adaptado de Olivares et al. (2014). As linhas tracejadas representam os *links* de comunicação para levar a informação do PCC e da MR para os controladores terciários, secundários e primários.



Fonte: Acervo pessoal.

Figura 2.13: Diagrama controlador terciário.

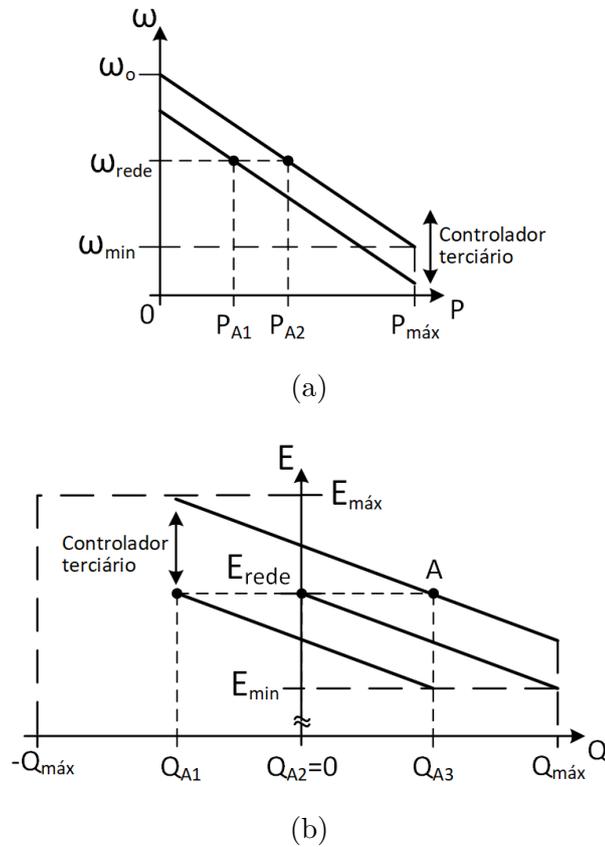
Controlador terciário convencional



Fonte: Acervo pessoal.

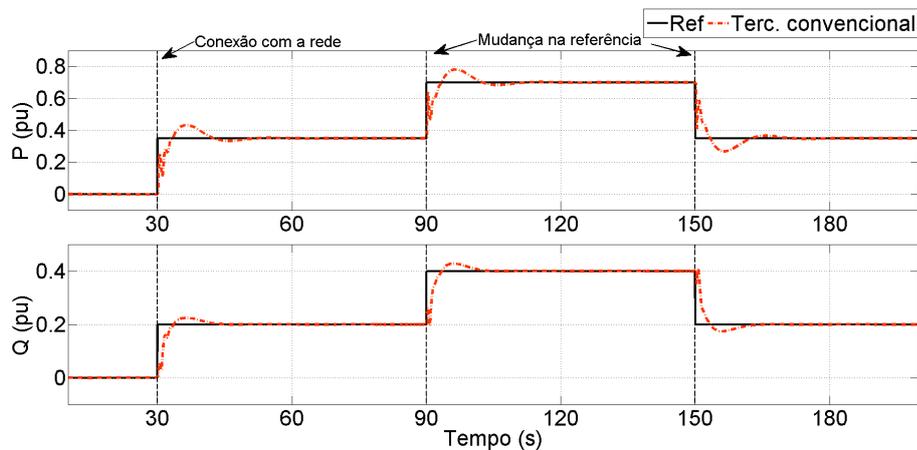
2.3.3 Sincronismo e ilhamento da microrrede

A associação de duas ou mais GDs em uma microrrede ou para que uma MR seja conectada à RD necessita que haja um algoritmo de sincronismo entre as GDs ou na microrrede. O sincronismo é responsável por aproximar a fase e a frequência da GD que

Figura 2.14: Atuação do controlador terciário nos controladores *droop*.

Fonte: Acervo pessoal.

Figura 2.15: Controlador terciário convencional controlando a potência que a microrrede fornece ao PCC.



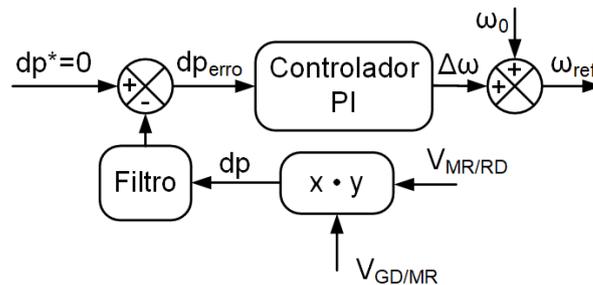
Fonte: Acervo pessoal.

deseja se conectar à MR ou da microrrede que pretende se conectar à RD. Comumente referido do inglês por *phase locked loop* (PLL), o sincronismo é inserido junto às malhas

de controle primário porque sua influência deve ser rápida para sincronizar a GD com a microrrede. Outro PLL deve ser adicionado à microrrede para sincronizar a MR à rede de distribuição, ou às outras microrredes. Este segundo PLL deve ser adicionado junto ao controlador secundário para sincronizar toda a microrrede com a tensão da RD.

Existem várias técnicas para sincronismo de microrredes utilizando PLL (MARAFÃO, 2004; WU; GUO; GU, 2011; ROCABERT et al., 2012). O PLL será tratado de acordo com Marafão (2004), apresentado na Fig. 2.16. Primeiramente, é calculado o produto interno entre as medidas de tensão da GD e da MR ou entre as tensões da MR e da RD. Se as tensões não estiverem em sincronismo, um sinal dp será gerado e comparado com a referência dp^* . Um controlador PI fará o controle da referência de frequência, que será repassada ao controlador primário caso a GD esteja se conectando à microrrede, ou ao controlador secundário, se a MR estiver conectando à RD.

Figura 2.16: Estrutura do sistema de sincronismo utilizado por Marafão (2004).



Fonte: Acervo pessoal.

Uma vez que a GD esteja conectada à MR, o controlador secundário assume os sinais de referência dos controladores primários. Caso a MR esteja sincronizada com a RD, a chave C_{rede} é fechada e um controlador terciário passa a atuar sobre a referência do controlador secundário. Um novo link de comunicação é necessário para que o controlador terciário gerencie as potências fornecidas pela MR à rede de distribuição.

A operação conectada à rede de distribuição traz a preocupação com a segurança da microrrede diante de eventos como um ilhamento não intencional. O ilhamento não intencional ocorre quando algum acidente acontece à estrutura da rede de distribuição, ou microrrede, causando a separação do sistema e a formação de novos subsistemas (AGUIAR et al., 2015). Portanto, um algoritmo de detecção de ilhamento deve ser implementado, juntamente ao controle primário, desconectando a GD, ou a MR, caso o ponto de operação não seja seguro para seus equipamentos. Neste trabalho não será discutido métodos para detecção da ocorrência de ilhamentos.

Os *links* de comunicação são limitantes nas microrredes pois aumentam o custo de instalação e manutenção e tornam a qualidade da energia gerada dependente desta infraestrutura (DÍAZ et al., 2014). Além disso, a estrutura de controlador hierárquico

convencional (CHC) necessita do chaveamento de controladores para que seu objetivo seja atingido.

Controlador multitarefa proposto

Neste capítulo propõe-se a utilização de um controlador secundário fuzzy (CSF) multitarefa para realizar o controle de uma microrrede, para reduzir a dependência dos sistemas de comunicação entre os níveis de controle e permitir o compartilhamento de cargas na microrrede. O CSF utiliza lógica fuzzy para gerenciar múltiplas variáveis de controle, mantendo a tensão e a frequência da microrrede dentro de limites de operação ou fornecendo potência ativa e reativa para a barra na qual a microrrede está conectada. O termo multitarefa é empregado para enfatizar a capacidade deste controlador em regular variáveis de controle por meio de uma mesma variável manipulada, sem que haja troca nas malhas de controle ou chaveamento de outro controlador, como nos controladores hierárquicos convencionais.

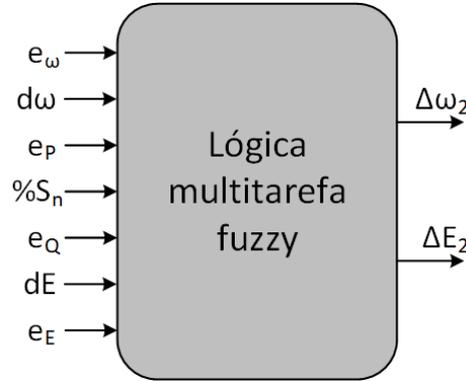
Na lógica fuzzy, a experiência do projetista é empregada para construir as leis de controle e gerenciar diferentes variáveis simultaneamente (DÍAZ et al., 2014). Assim, o CSF deve manter as vantagens da utilização do controlador *droop*, que é o compartilhamento de carga, e corrigir os desvios de frequência e tensão em modo isolado ou fornecer a potência pré-estabelecida (decorrente da disponibilidade de produção das fontes alternativas) durante a operação conectada à rede de distribuição.

3.1 Configuração do controlador fuzzy

O CSF proposto é composto por um processo de inferência fuzzy multitarefa, o qual possui sete entradas e duas saídas, e controladores de saída. As entradas foram escolhidas para evitar a comunicação entre as GDs utilizando variáveis que possam ser amostradas localmente. O controlador secundário fuzzy utiliza a frequência, a tensão, as potências ativa e reativa fornecidas pela microrrede e os gradientes da frequência e da tensão, como mostra a Fig. 3.1. Os erros e os gradientes de frequência e de tensão são representados por e_ω , e_E , $d\omega$ e dE , respectivamente. O erro de potência ativa por e_p e o erro de potência reativa por e_Q . A potência aparente fornecida pela microrrede é representada por $\%S_n$. A partir dessas entradas, o CSF infere as saídas de frequência e tensão para alterar o ponto

de operação dos controladores *droop*.

Figura 3.1: Entradas e saídas da inferência do controlador secundário fuzzy de frequência e tensão proposto e suas respectivas entradas e saídas.



Fonte: Acervo pessoal.

As tensões e as correntes são medidas no PCC da microrrede. Os valores medidos são utilizados para os cálculos das potências ativa, reativa e o módulo da potência aparente. As entradas $d\omega$ e dE são os gradientes de frequência e tensão, utilizadas para assegurar que o CSF não possua atuação mais rápida do que a do controlador *droop* é capaz de sintetizar, o que resultaria em oscilações destas grandezas. Essas são definidas por

$$d\omega = K_{d\omega} \frac{s\omega_{pcc}}{1 + sT_{InFPB}} \quad (3.1)$$

e

$$dE = K_{dE} \frac{s|E_{pcc}|}{1 + sT_{InFPB}} \quad (3.2)$$

sendo os ganhos $K_{d\omega}$ e K_{dE} utilizados para normalizar as entradas dentro do universo de discurso e T_{InFPB} é a constante de tempo dos filtros passa-baixa utilizados para atenuar os ruídos de alta frequência do gradiente. Já as entradas e_ω e e_E são os desvios de frequência e tensão, calculados pela diferença entre os valores de referências nominais (ω_0 e E_0) e valores medidos no PCC (ω_{pcc} e $|E_{pcc}|$), respectivamente, ou seja:

$$e_\omega = K_{e\omega} (\omega_{ref} - \omega_{pcc}) \quad (3.3)$$

e

$$e_E = K_{eE} (E_{ref} - |E_{pcc}|) \quad (3.4)$$

na qual os ganhos $K_{e\omega}$ e K_{eE} são utilizados para normalização da entrada dentro do universo de discurso das variáveis e_ω e e_E . Quando o elo no qual a microrrede está conectada permite injeção potência, a potência exportada é gerenciada pelas entradas e_P e e_Q . Os erros de potência são definidos por

$$e_P = K_{eP} (P_{ref} - P_{MG}) \quad (3.5)$$

e

$$e_Q = K_{eQ} (Q_{\text{ref}} - Q_{\text{MG}}) \quad (3.6)$$

enquanto os ganhos K_{eP} e K_{eQ} fazem o mesmo papel de $K_{e\omega}$, mas para as entradas e_P e e_Q .

As combinações de $\%S_n$, e_ω , e_E , $d\omega$, dE , e_P e e_Q fornecem as saídas $\Delta\omega_2$ e ΔE_2 , que transladam as curvas do controlador *droop* para cima ou para baixo, dependendo do ponto de operação da microrrede. Os sinais de saída da inferência fuzzy do CSF ainda são processados em um controlador de saída, a fim de zerar os termos $\Delta\omega_2$ e ΔE_2 , antes de serem somados às referências de tensão e frequência de suas respectivas malhas de controles. Ou seja, $\Delta\omega_2$ e ΔE_2 funcionam como um erro que deve ser condicionado e adicionado à curva do *droop*. A sintonia deste controlador determina a dinâmica do CSF, uma vez que o fuzzy é instantâneo, podendo ser mais rápido ou mais lento, de acordo com as sintonias realizadas para cada tipo de microrrede. As variáveis de entrada e saída da inferência fuzzy são relacionadas através de funções de pertinência.

3.2 Funções de pertinência

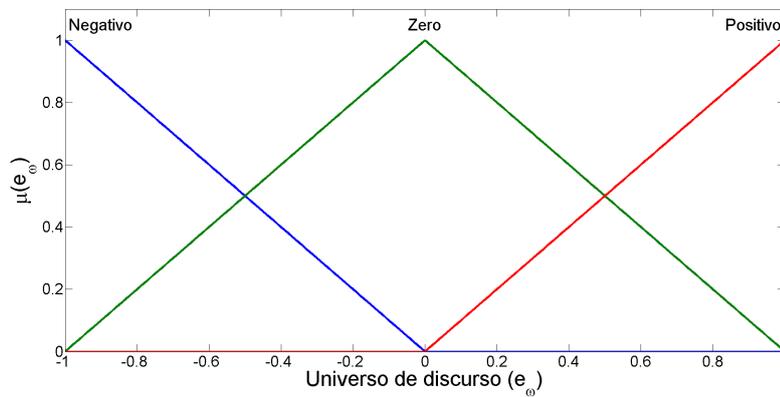
As entradas da inferência fuzzy foram definidas a partir de funções de pertinência triangulares, trapezoidais e *singletons* e seus respectivos universos de discurso normalizados em pu.

As entradas e_ω e e_E foram definidas no intervalo $[-1;1]$ pu através de três funções de pertinência triangulares e nomeadas por “Negativo”, “Zero” e “Positivo”. As características das funções de pertinência são apresentadas na Fig. 3.2. As funções de pertinência foram escolhidas como triangulares com interseção em 0,5 pu para que a interpretação dada para estas variáveis não seja tão rígida, permitindo que a microrrede opere em torno da referência.

As entradas gradiente da frequência e da tensão foram definidas entre $[0;1]$ pu como “Quase Zero” ou “Maior que Zero”, com interseção em 0,05 pu, e são apresentadas na Fig. 3.3. A escolha do cruzamento foi feito de forma que para um pequeno valor de gradiente de frequência ou tensão, a ação do CSF deve ser minimizada para que a MR atinja o equilíbrio ($d\omega$ e dE tendendo a zero). As funções de pertinência de ambas as entradas são triangulares para “Quase Zero” e trapezoidal para “Maior que Zero”.

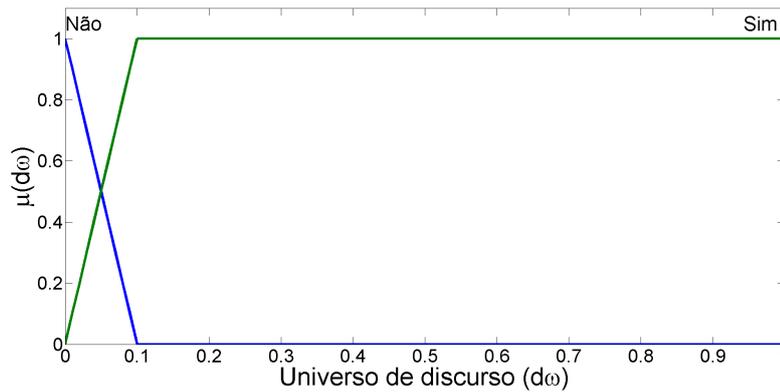
A variável $\%S_n$ foi definida no intervalo $[0;1,2]$ pu e suas funções de pertinência foram definidas como “Vazio” (V), “Carregado” (C) e “Sobrecarregado” (SC). As variáveis linguísticas “Vazio” e “Sobrecarregado” são definidas como trapezoidais e “Carregado” como triangular. O objetivo de descrever a entrada $\%S_n$ nestas três funções é fazer com que a microrrede opere normalmente em “Vazio” e com limitações em “Carregado”, não fornecendo mais potência do que deveria. Quando a operação atingir valores para “So-

Figura 3.2: Função de pertinência da entrada e_ω . As mesmas funções de pertinência foram utilizadas para e_E .



Fonte: Acervo pessoal.

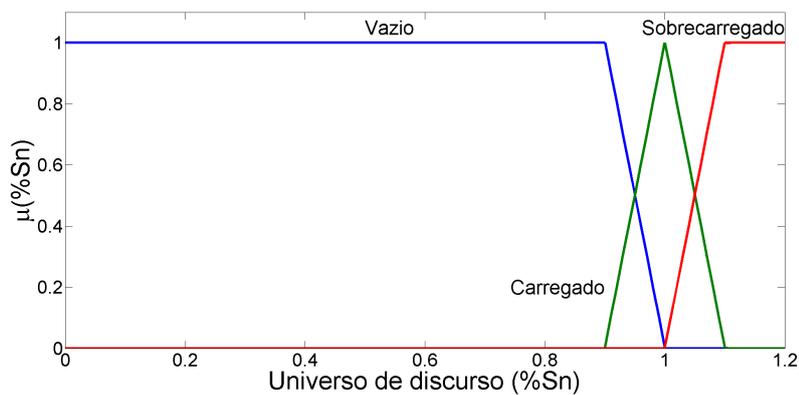
Figura 3.3: Funções de pertinência para as entradas $d\omega$ e dE .



Fonte: Acervo pessoal.

brecarregado”, o CSF deve cessar ou reduzir a potência injetada, se possível, antes que algum dispositivo de proteção seja ativado.

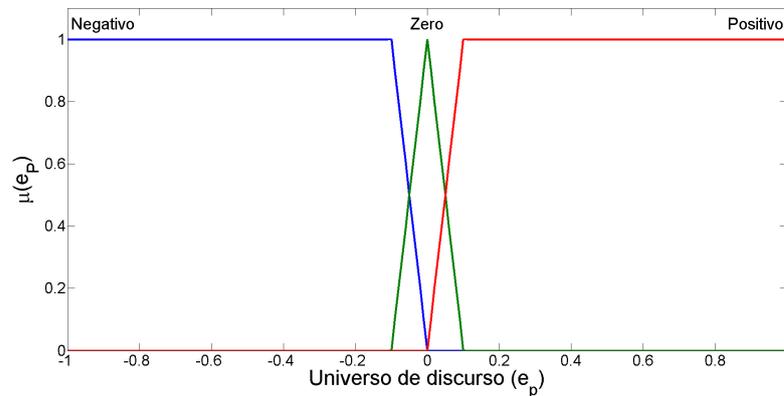
Figura 3.4: Distribuição das funções de pertinência para a entrada $\%S_n$.



Fonte: Acervo pessoal.

As características das entradas e_P e e_Q são apresentadas na Fig. 3.5. Ambas as entradas de erro de potência foram descritas como “Negativo”, “Zero” e “Positivo”. As funções de pertinência “Negativo” e “Positivo” são funções trapezoidais e “Zero” é triangular. Diferentemente de e_ω e e_E , as três funções de pertinência se cruzam em $\pm 0,05$ pu, diminuindo a amplitude de oscilação em torno das potências de referência. Quanto mais estreita a faixa da variável linguística “Zero”, menor é a amplitude e maior é a frequência da oscilação gerada pelo controlador fuzzy, de maneira análoga a um controlador por histerese.

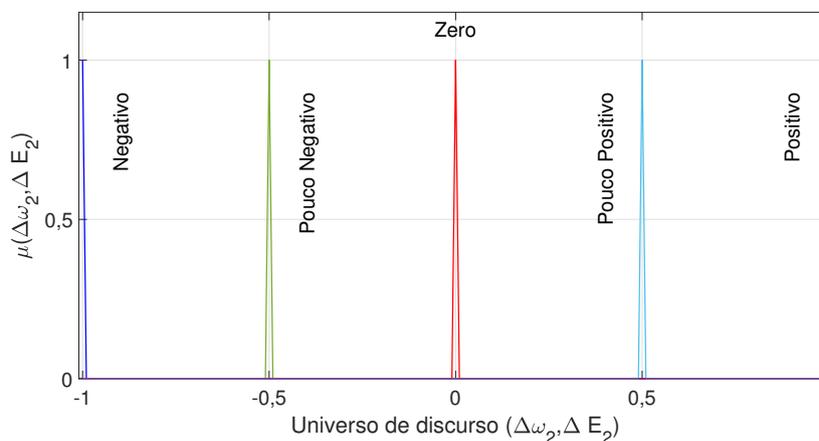
Figura 3.5: Funções de pertinência para os erros de potência e_P e e_Q .



Fonte: Acervo pessoal.

As saídas da inferência do CSF foram configuradas no intervalo $[-1;1]$ pu, em relação aos desvios predeterminados, com variáveis linguísticas “Negativo”, “Pouco negativo”, “Zero”, “Pouco positivo” e “Positivo”, localizadas em -1 , $-0,5$, 0 , $0,5$ e 1 pu, respectivamente, e são apresentadas na Fig. 3.6. As funções de pertinência são do tipo *singletons*, permitindo a utilização de todo o universo de discurso em que as saídas estão definidas.

Figura 3.6: Funções de pertinência para as saídas $\Delta\omega_2$ e ΔE_2 .



Fonte: Acervo pessoal.

Depois de configuradas as variáveis linguísticas que compõem as entradas e saídas do CSF, todas as variáveis devem ser combinadas através de regras que farão a inferência de $\Delta\omega_2$ e ΔE_2 .

3.3 Regras do CSF

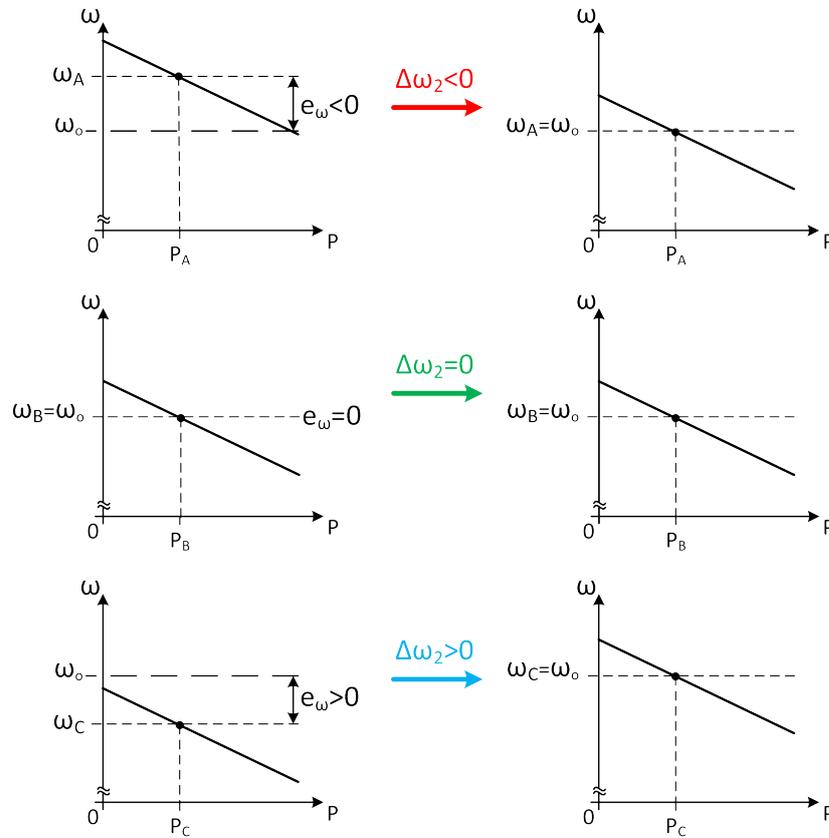
As regras do CSF foram definidas para relacionar todas variáveis linguísticas das entradas com as saídas do controlador. Como o controle de frequência e tensão são prioritários em relação ao controle de potência ativa e reativa, a construção das regras começou pelo modo isolado de operação.

As primeiras variáveis a serem testadas são $d\omega$ e dE . Por exemplo, se houver uma variação da frequência ou da tensão, as saídas $\Delta\omega_2$ e ΔE_2 , respectivamente, devem ser “Zero”, para que o CSF aguarde os transitórios das variações diminuírem. Se $d\omega$ ou dE forem “Quase Zero”, os erros de tensão e frequência são analisados. As regras para os erros de tensão e frequência seguem as lógicas apresentadas nas Figs. 3.7 e 3.8. A Fig. 3.7 mostra a microrrede operando em três níveis diferentes de frequência. No ponto de operação (ω_A, P_A) , o erro de frequência é menor que zero e o CSF precisa aplicar uma saída negativa para corrigir o desvio. O ponto de operação da potência ativa não varia porque é o exigido pela carga local. No ponto de operação (ω_B, P_B) , o erro é zero, então $\Delta\omega_2$ é zero. Já o ponto de operação (ω_C, P_C) há erro positivo, exigindo uma atitude positiva do CSF para retornar ao ponto nominal de operação.

A atuação do CSF para correção do desvio de tensão opera de maneira semelhante à correção de frequência, como mostrado na Fig. 3.8. Por exemplo, se e_E for negativo, como no ponto de operação (E_A, Q_A) , ΔE_2 deve ser menor que zero para diminuir a referência da malha de controle de tensão. Já a correção de tensão para o ponto de operação (E_C, Q_C) , ocorre com uma atitude positiva do CSF, como em (ω_C, P_C) , e em (E_B, Q_B) não é necessário que o CSF atue, fazendo $\Delta E_2 = 0$.

Ao conectar a microrrede ao PCC, a frequência e a tensão são controladas pela rede de distribuição. É preciso controlar a potência ativa e reativa que está sendo exportada. Com isso, as entradas de erro de potência ativa e reativa foram levadas em consideração para a construção das regras seguintes. As regras para potência ativa e reativa seguem a mesma lógica, portanto os casos semelhantes foram omitidos.

Se a microrrede opera com desvio negativo de frequência, a atitude do CSF deve ser minimizar o erro até uma faixa aceitável pela lógica fuzzy, independente do erro de potência ativa e do modo de operação da MR, como exibido nas Figs. 3.9, 3.10 e 3.11. A Figura 3.9 apresenta a atitude do CSF para entradas negativas de erro de frequência e potência ativa. A saída ΔE_2 segue o mesmo comportamento dados as entradas e_Q e e_E “Negativas”. A Figura 3.9 mostra que o comportamento da frequência depende do modo de operação da microrrede, isolada ou conectada à rede de distribuição. Se isolada,

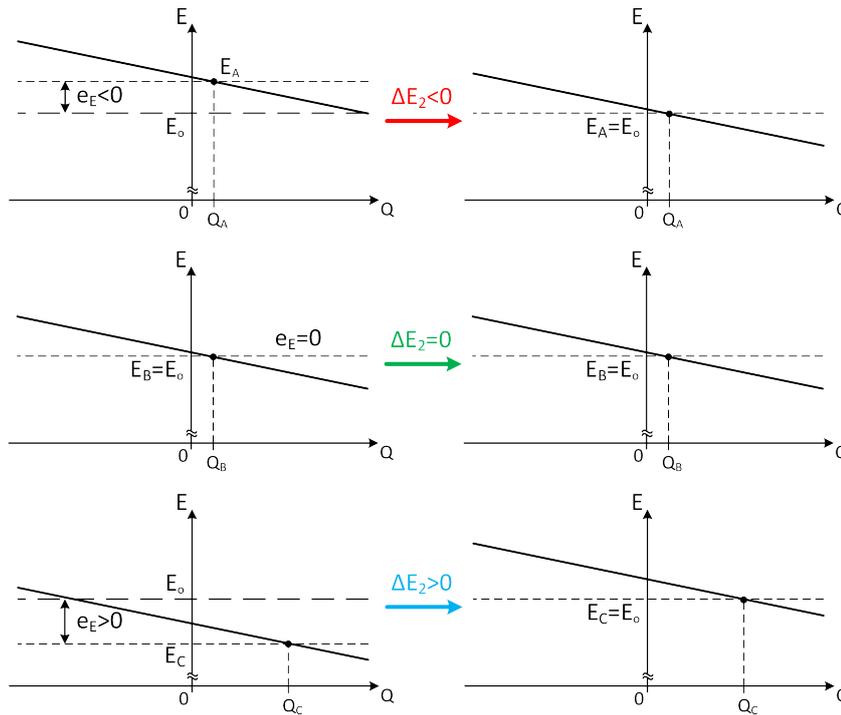
Figura 3.7: Variação da reta do *droop* de acordo com a entrada e_ω .

Fonte: Acervo pessoal.

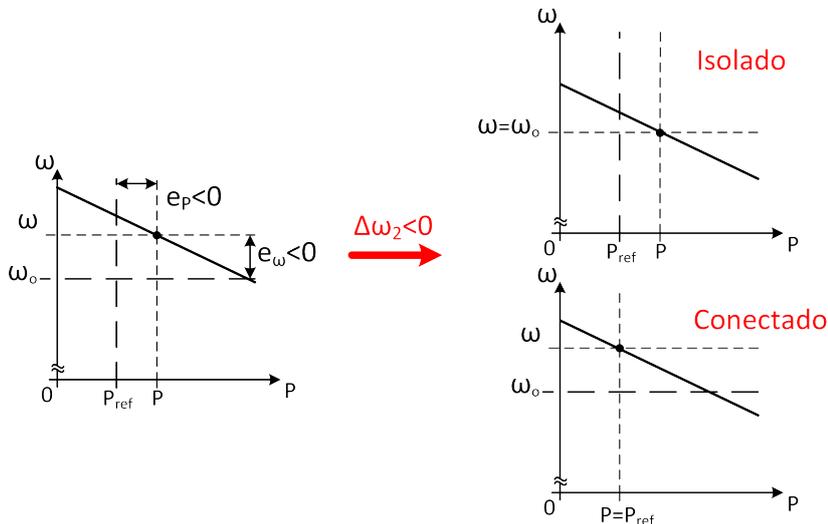
a potência consumida pela carga continua a mesma, resultando na variação da frequência da microrrede. Se conectado, a frequência da microrrede é ditada pela rede, fazendo com que o CSF controle a potência de acordo com P_{ref} . O mesmo acontece nas Figs. 3.10 e 3.11, onde o CSF corrige a frequência (modo isolado) e a potência ativa (modo conectado).

Se o erro de frequência/tensão estiver próximo ou igual a zero, a saída do CSF será dada de acordo com o erro da potência ativa/reactiva, respectivamente. A Figura 3.12 apresenta o comportamento de $\Delta\omega_2$ para e_P menor do que zero. Novamente, se a microrrede operar isolada da rede de distribuição, e_P não pode ser minimizado, pois a potência ativa é a demandada pela carga local. Porém, se a microrrede estiver conectada, e_P pode ser corrigido como mostrado na Fig. 3.12.

As regras discutidas até aqui não levaram em consideração a potência aparente que a microrrede estava fornecendo porque, em todos os casos, $\omega \geq \omega_0$. Entretanto, os próximos casos podem exigir uma atitude do CSF dada por $\Delta\omega_2 \geq 0$, como mostrado na Fig. 3.13. Quando a microrrede fornece mais de 1 pu de potência aparente, o CSF atua para diminuir a corrente gerada pela fonte de modo a não danificá-la. Neste caso, mesmo operando conectado, a microrrede manterá a operação com $e_P > 0$, pois não é permitido exportar mais potência. Por outro lado, uma vez que o CSF não analisa o sinal da potência reativa

Figura 3.8: Variação da reta do droop de acordo com a entrada e_E .

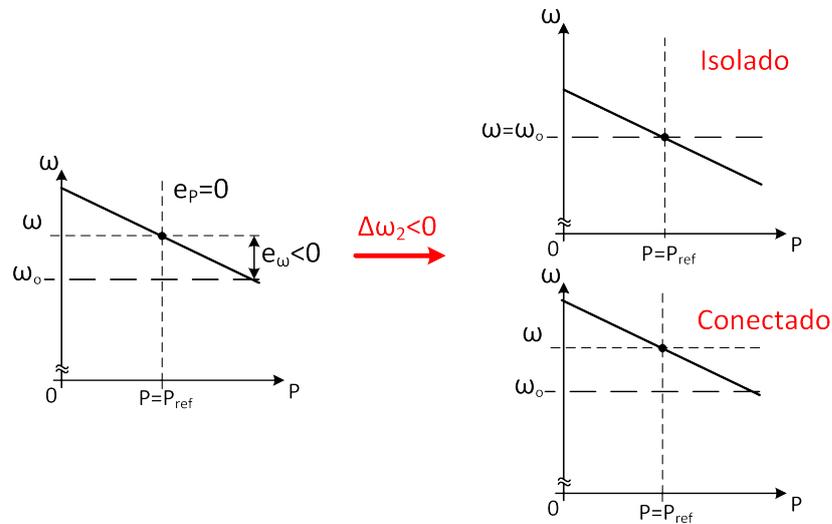
Fonte: Acervo pessoal.

Figura 3.9: Atitude do CSF para e_ω e e_p “Negativos”.

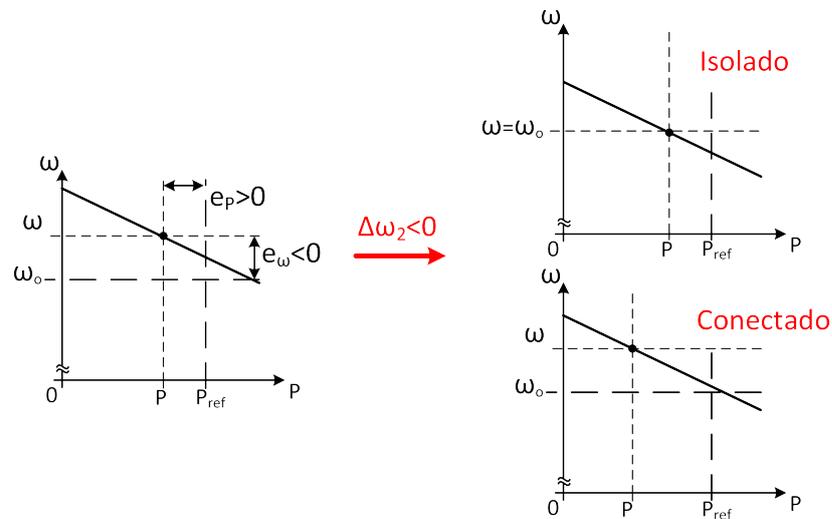
Fonte: Acervo pessoal.

que está fornecendo, apenas o erro da potência reativa e_Q , se $\%S_n \geq 1$ então a atitude para ΔE_2 deve ser “Zero”. Este comportamento para tensão foi definido para que um acréscimo de potência reativa não fosse realizado até que o CSF receba $\%S_n < 1$.

As combinações em que $\%S_n$ for “Carregado”, a saída $\Delta\omega_2$ deve ser “Zero” e para $\%S_n >$

Figura 3.10: Atitude do CSF para e_ω “Negativo” e e_P “Zero”.

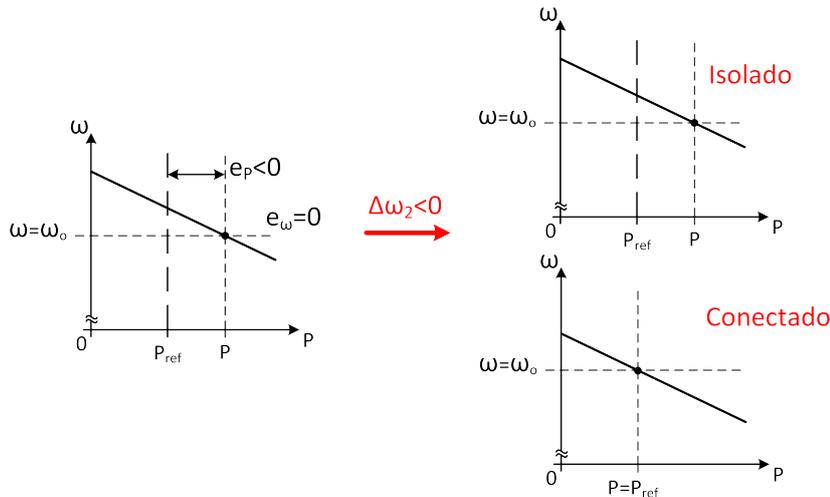
Fonte: Acervo pessoal.

Figura 3.11: Atitude do CSF para e_ω “Negativo” e e_P “Positivo”.

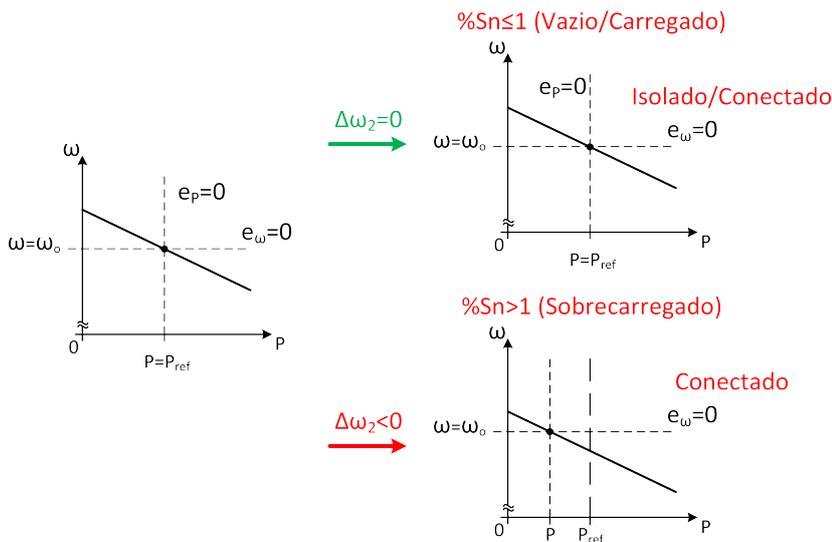
Fonte: Acervo pessoal.

1, a saída deve ser $\Delta\omega_2 < 0$. A combinação $e_\omega = 0$, $e_P > 0$ e $\%S_n$ “Vazio” é apresentada na Fig. 3.14. Quando a microrrede está conectada, a saída $\Delta\omega_2$ será “Zero”, pois não há erro na frequência. Caso a microrrede esteja conectada, a saída do CSF será $\Delta\omega_2 > 0$ até atingir $e_P = 0$.

Após um transitório de entrada de carga, o controle de frequência em *droop* faz com que apareça um erro positivo, ou seja, $e_\omega > 0$. A Figura 3.15 apresenta a atitude do CSF para a condição $e_\omega > 0$, $\%S_n$ “Vazio” e as três condições de e_P , representadas pelos pontos de operação P_1 , P_2 e P_3 . No modo isolado, o erro da frequência foi corrigido de acordo

Figura 3.12: Atitude do CSF para $e_\omega = 0$ e $e_p < 0$.

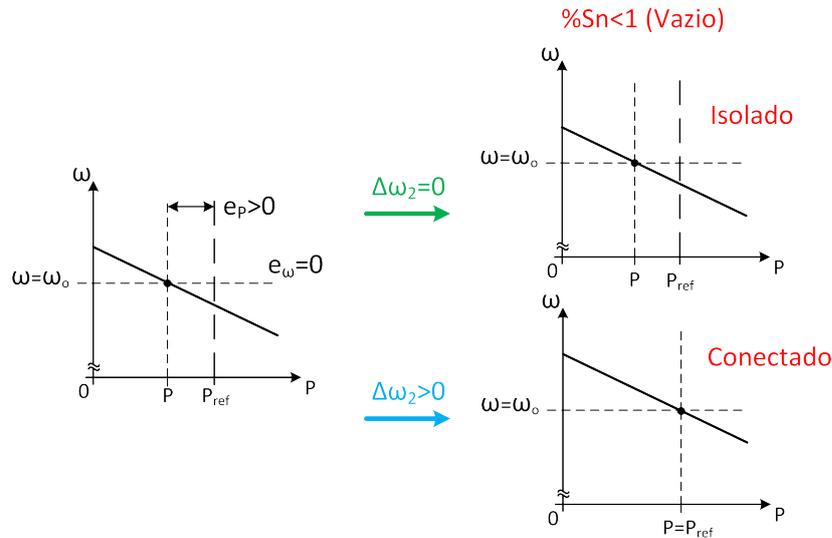
Fonte: Acervo pessoal.

Figura 3.13: Atitude do CSF para e_ω e e_p nulos.

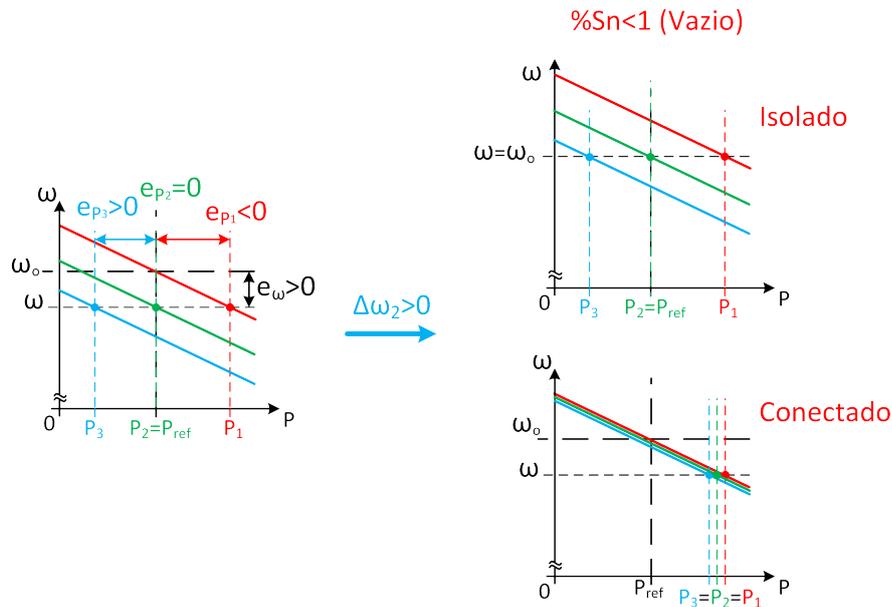
Fonte: Acervo pessoal.

com o esperado. Entretanto, se a microrrede estiver conectada, o CSF tentará diminuir e_ω até atingir o limite de potência gerado. Caso o limite seja atingido, a operação segue de acordo com a Fig. 3.15 ($P_1 = P_2 = P_3$). Se a microrrede for grande o suficiente para influenciar a frequência da rede e e_ω ir para “Zero”, a potência ativa será controlada de acordo com P_{ref} ou até atingir o limite de potência gerada.

No total, foram definidas 108 regras para o CSF, 54 para cada saída. As regras foram sintetizadas e são exibidas nas Figs. 3.16 e 3.17. A escolha de $\Delta\omega_2 < 0$ ser “Negativo” ou “Pouco negativo” depende das entradas e_ω e e_p . Se e_ω e e_p forem negativas, $\Delta\omega_2$ é “Negativo”, caso contrário, $\Delta\omega_2$ é “Pouco negativo”. O mesmo acontece para $\Delta\omega_2 > 0$, se

Figura 3.14: Atitude do CSF para e_ω “Zero” e e_P “Positivo”.

Fonte: Acervo pessoal.

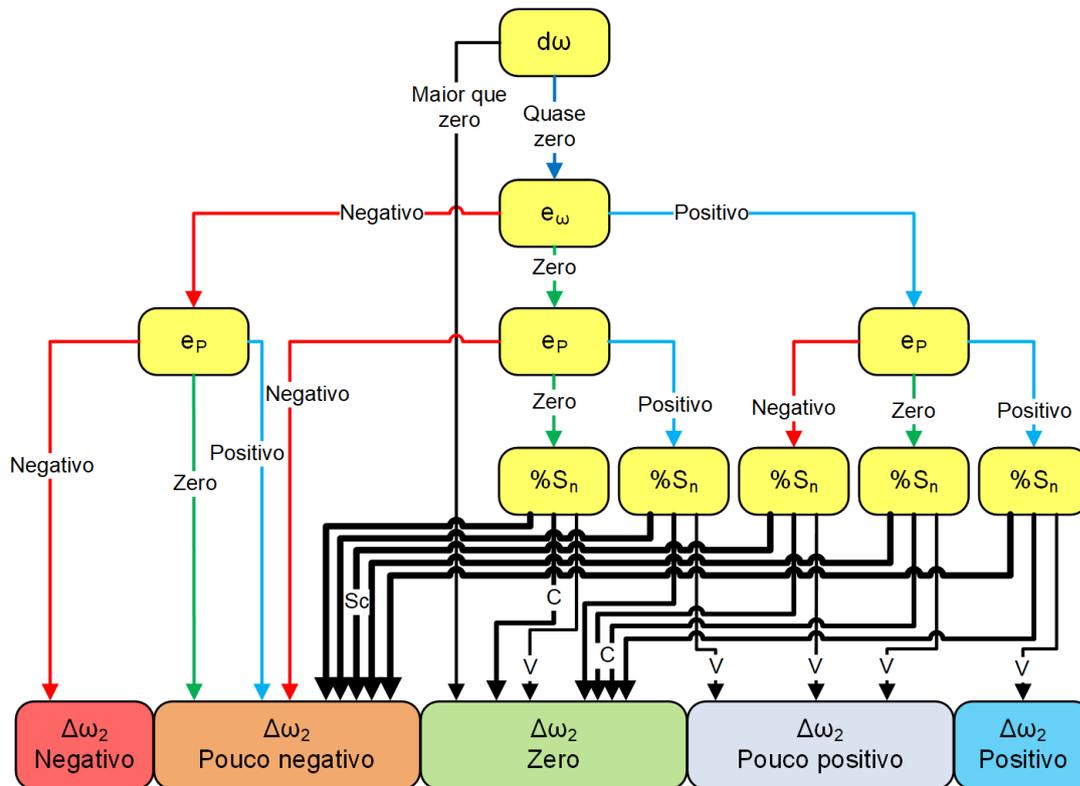
Figura 3.15: Atitude do CSF para $e_\omega > 0$, $\%S_n < 0,9$ e os três pontos de operação para e_P .

Fonte: Acervo pessoal.

os sinais das entradas forem positivos, a saída $\Delta\omega_2$ é “Positivo”, caso contrário, $\Delta\omega_2$ é “Pouco positivo”. A espessura das linhas que saem dos blocos $\%S_n$ indicam se a variável foi considerada “Vazio” (V, espessura mais fina), “Carregado” (C, espessura mediana) e “Sobrecarregado” (Sc, espessura mais grossa).

Diferente do *droop* de frequência, o *droop* de tensão pode operar fornecendo ou absorvendo potência reativa, ou seja, com corrente atrasada ou adiantada da tensão terminal da GD. Então, quando o CSF controla a tensão terminal, as regras são definidas de ma-

Figura 3.16: Fluxograma com o resumo das condições de operação do CSF utilizado para implementação das regras para a saída $\Delta\omega_2$.



Fonte: Acervo pessoal.

neira semelhante ao controle de frequência. Na Figura 3.17 é possível ver que algumas setas que saem dos blocos $\%S_n$ possuem direções que não são as mesmas encontradas na Fig. 3.16. Estas diferenças são baseadas no comportamento do *droop* de tensão, que opera nos sentidos positivo e negativo do eixo de potência reativa. Por exemplo, se dE é “não”, e_E é “Zero”, o erro de potência reativa e_Q será utilizado para definir qual a atitude do CSF em relação ao sobrecarregamento da GD.

3.4 Estrutura do controlador multitarefas

O controlador multitarefas proposto possui ganhos de entrada, para normalizar os valores de entrada aos universos de discurso, e controladores de saída para condicionar a saída da inferência do CSF. A estrutura do controlador multitarefa é exibida na Fig. 3.18.

3.4.1 Ganhos de entrada

A norma IEEE 1547.2 (IEEE Std 1547.2, 2009) define os limites de frequência em que as GDs conectadas à rede podem operar. Caso uma GD esteja conectada a uma rede de

distribuição e houver um distúrbio que a leve a funcionar fora destes limites, a GD deve ser desconectada.

De acordo com a Figura 3.2, o cruzamento da função de pertinência “Zero” com as funções de pertinência “Negativo” e “Positivo” estão localizadas em -0,5 e 0,5, respectivamente. Estes cruzamentos determinam quando a resposta do CSF deve ser mais “Negativa” do que “Zero”, para $e_\omega < -0,5$, ou mais “Positiva” do que “Zero”, quando $e_\omega > 0,5$. O ganho $K_{e\omega}$, em (3.3), é o responsável por equivaler o valor do erro real com o valor do universo de discurso de e_ω .

Os limites de frequência em regime, definido pela norma, são 60,5 Hz e 59,8 Hz para que nenhuma proteção atue e a GD seja desconectada. Assim, dado uma margem de operação predefinida, é possível calcular o ganho da entrada e_ω por

$$K_{e\omega} = \frac{\text{Cruzamento entre as funções de pertinência (pu)}}{\text{Desvio máximo de frequência permitido (pu)}}. \quad (3.7)$$

Ainda, de acordo com IEEE Std 1547.2 (2009), os limites de operação da tensão terminal para que a GD funcione conectada a rede de distribuição são 110% e 88% da tensão nominal do elo CA. Sendo assim, escolhendo uma margem de erro na correção de tensão, o ganho K_{eE} é dado por:

$$K_{eE} = \frac{\text{Cruzamento entre as funções de pertinência (pu)}}{\text{Desvio máximo de tensão permitido (pu)}}$$

Os ganhos $K_{d\omega}$ e K_{dE} e a frequência de corte dos filtros $G_{d\omega}$ e G_{dE} foram sintonizados para que o CSF não atuasse durante a mudança dos pontos de operação causada pelo *droop*. A interseção entre as funções de pertinência das entradas e_P e e_Q estão posicionadas em $\pm 0,05$, como mostrado na Fig. 3.5. Assim, os ganhos de entrada K_{eP} e K_{eQ} vão determinar qual o desvio máximo permitido para as potências ativa e reativa.

3.4.2 Controladores de saída

As saídas da inferência fuzzy do CSF são condicionadas para serem adicionadas aos controladores *droop* de tensão e frequência, a fim de regular as variáveis de interesse. Neste trabalho, duas propostas de controladores de saída são feitas, uma para cada tipo de microrrede. Esta separação se deve ao fato de que as microrredes com geradores síncronos possuem uma inércia maior e, conseqüentemente, são sistemas mais lentos. Na verdade, o CSF para o GMG é um caso particular da aplicação deste controlador, como será visto a seguir.

A proposta para os controladores de saídas do CSF inclui um filtro passa baixa e um integrador como segue:

$$\begin{aligned} \omega_2 &= G_{\text{CSF},\omega} \Delta\omega_2 \\ &= \left(\frac{K_{p,\omega}}{sT_{\text{outFPB}} + 1} + \frac{K_{i,\omega}}{s} \right) \Delta\omega_2 \end{aligned} \quad (3.8)$$

e

$$\begin{aligned} E_2 &= G_{\text{CSF},E} \Delta E_2 \\ &= \left(\frac{K_{p,E}}{sT_{\text{outFPB}} + 1} + \frac{K_{i,E}}{s} \right) \Delta E_2 \end{aligned} \quad (3.9)$$

na qual $\Delta\omega_2$ e ΔE_2 são as saídas da inferência fuzzy do CSF, $K_{p,\omega}$ e $K_{p,E}$ são os ganhos proporcionais de saída que atuam juntamente com filtros passa-baixa de constante de tempo T_{outFPB} . Os ganhos $K_{i,\omega}$ e $K_{i,E}$ são os ganhos dos integradores que modificam a saída até que $\Delta\omega_2$ e ΔE_2 sejam zero.

As saídas da inferência fuzzy do CSF $\Delta\omega_2$ e ΔE_2 são processadas pelo controlador de saída e, finalmente, fornecer as variáveis de controle ω_2 e E_2 . A partir de um conjunto de entradas discretas, as saídas $\Delta\omega_2$ e ΔE_2 podem variar abruptamente. Com isso, um filtro passa-baixa é necessário para atenuar estas mudanças causadas pelo processo de inferência da lógica fuzzy. A frequência de corte do filtro de saída do CSF deve ser no máximo dez vezes menor do que a dos filtros de potência utilizados no controlador *droop* para que as dinâmicas não resultem em conflitos. O termo integral acumula os valores das saídas da inferência do CSF, segurando o montante para ser aplicado sobre a curva de operação dos *droops*.

3.4.3 CSF para os inversores

Os ganhos de entrada foram definidos a partir da definição do desvio máximo de frequência e tensão, dados por (3.7) e (3.8), respectivamente. A faixa predeterminada de operação da frequência foi definida sendo $\pm 0,05$ Hz, de 49,95 Hz até 50,05 Hz, porque foi considerada a frequência de 50 Hz como nominal. A frequência de operação de 50 Hz foi escolhida pois esta parte do trabalho foi desenvolvida durante o intercâmbio na Universidade de Aalborg. Além disso, para a tensão terminal foi atribuído um desvio máximo no intervalo entre $\pm 7,5\%$, de 0,925 pu até 1,075 pu.

As entradas $d\omega$ e dE passam por um filtro passa-baixa para atenuar os ruídos de alta frequência da derivada. Os ganhos de entrada e as constantes de tempo dos filtros foram ajustadas para que o CSF não atuasse sobre a microrrede durante um transitório de frequência ou tensão. Tanto para $K_{d\omega}$ quanto para K_{dE} , foi atribuído o valor 0,1. A constante de tempo do filtro foi definida como $T_{\text{InFPB}} = 1$ s. Como os pontos de cruzamento dos erros de potência ativa e reativa estão localizados em $\pm 0,05$, Fig. 3.5, os ganhos de entrada K_{eP} e K_{eQ} foram definidos como 1.

Os parâmetros dos controladores das saídas foram sintonizados para obter uma resposta no tempo semelhante à resposta quando a microrrede opera com o CHC. Os ganhos $K_{p,\omega}$, $K_{i,\omega}$, $K_{p,E}$ e $K_{i,E}$ foram definidos como 0,004, 0,1, 0,05 e 0,5, respectivamente. A constante de tempo do filtro de saída foi definida como 1 Hz, dez vezes menor do que a do filtro de potência do *droop*.

3.4.4 CSF para o GMG

Os ganhos de entrada foram definidos de acordo com a operação. Os ganhos $K_{d\omega}$ e K_{dE} foram ajustados em 100, 10, respectivamente, e os pólos dos filtros foram posicionados em -1. Dada uma margem de operação de $\pm 0,2$ Hz (59,8 Hz a 60,2 Hz) e escolhendo um valor de desvio máximo de metade dessa faixa ($\pm 0,1$ Hz), o ganho da entrada para e_ω é calculado por (3.7). Com o valor de cruzamento de 0,5 pu e o desvio 0,1 Hz, obtém-se $K_{e\omega} = 300$.

Por sua vez, como os limites de operação da tensão terminal são 110% e 88%, para a GD continuar operando conectada à rede de distribuição (IEEE Std 1547.2, 2009) define-se uma margem de $\pm 2,5\%$ (97,5 pu a 1,025 pu) para o desvio máximo de tensão e o ponto de cruzamento entre as funções de pertinência são $\pm 0,5$. Então, como em (3.8), o ganho para a entrada e_E é $K_{eE} = 20$.

As saídas do CSF contém controladores para regular $\Delta\omega_2$ e ΔE_2 nas malhas de controle de frequência e tensão da GD e portanto precisam ser integrados. Então, para a microrrede com geradores síncronos, os sinais de controle ω_2 e E_2 são dados por:

$$\omega_2 = \frac{K_{i,\omega}}{s} \Delta\omega_2 \quad (3.10)$$

e

$$E_2 = \frac{K_{i,E}}{s} \Delta E_2 \quad (3.11)$$

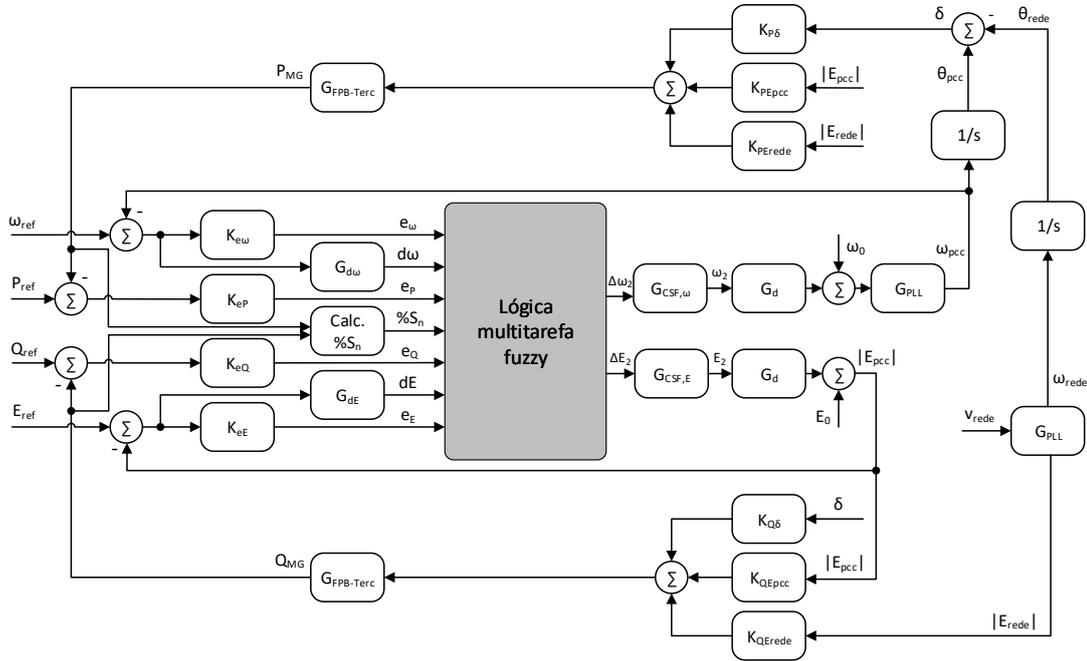
nos quais os ganhos $K_{i,\omega}$ e $K_{i,E}$ influenciam na dinâmica do sistema, tornando a atuação do CSF mais rápida ou mais lenta. Atuações rápidas do CSF podem causar instabilidade quando a microrrede estiver conectada à rede de distribuição ou compartilhando cargas com outra GD.

As estruturas apresentadas são eficientes para regular as variáveis de interesse se a microrrede estiver conectada ou não à rede de distribuição. Uma vez definidas as estruturas dos controladores de saída e os ganhos de entrada do CSF, faz-se necessário a análise da estabilidade do controlador proposto.

3.5 Análise da estabilidade

O estudo da estabilidade do controlador multitarefas secundário fuzzy foi realizado para as malhas de controle apresentadas na Fig. 3.19. As saídas ω_2 e E_2 são repassadas aos controladores *droop* através de *links* de comunicação de banda estreita. O atraso desta comunicação é representada pelo bloco G_d , que consiste em um filtro passa-baixa com constante de tempo de 10 ms. A frequência ω_{pcc} é medida através de um PLL, representado pelo bloco G_{PLL} . Se a microrrede estiver operando de modo isolado, não há interação com a rede. Caso contrário, existe uma troca de potência ativa e reativa.

Figura 3.19: Controle hierárquico da microrrede com o controlador multitarefas fuzzy.



Fonte: Acervo pessoal.

A partir das equações 2.6 e 2.7, aplicando para o caso da microrrede, tem-se:

$$P_{MG} = \frac{|E_{pcc}|^2}{|Z|} \cos(\theta_Z) - \frac{|E_{pcc}||E_{rede}|}{|Z|} \cos(\delta + \theta_Z) \quad (3.12)$$

$$Q_{MG} = \frac{|E_{pcc}|^2}{|Z|} \text{sen}(\theta_Z) - \frac{|E_{pcc}||E_{rede}|}{|Z|} \text{sen}(\delta + \theta_Z) \quad (3.13)$$

na qual $Z = R + jX$ é a impedância da linha que conecta o PCC à rede, $\theta_Z = \tan^{-1}(X/R)$ é o ângulo da impedância e $\delta = \theta_{pcc} - \theta_{rede}$ é o ângulo de defasagem entre as tensões do PCC e da rede. Linearizando nos pontos de operação $P_{MG,op} = 0,2$ pu, $Q_{MG,op} = 0$ pu, $|E_{pcc,op}| = 0,9945$ pu, $|E_{rede,op}| = 1$ pu, $\delta_{op} = -0,005$ rad, $|Z| = 0,00371$ pu, $X/R = 1$ pu e $\theta_Z = \pi/4$ rad, P_{MG} e Q_{MG} podem ser estimadas por

$$\begin{bmatrix} P_{MG} \\ Q_{MG} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{P\delta} & K_{PE_{pcc}} & K_{PE_{rede}} \\ K_{Q\delta} & K_{QE_{pcc}} & K_{QE_{rede}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \\ |E_{pcc}| \\ |E_{rede}| \end{bmatrix}, \quad (3.14)$$

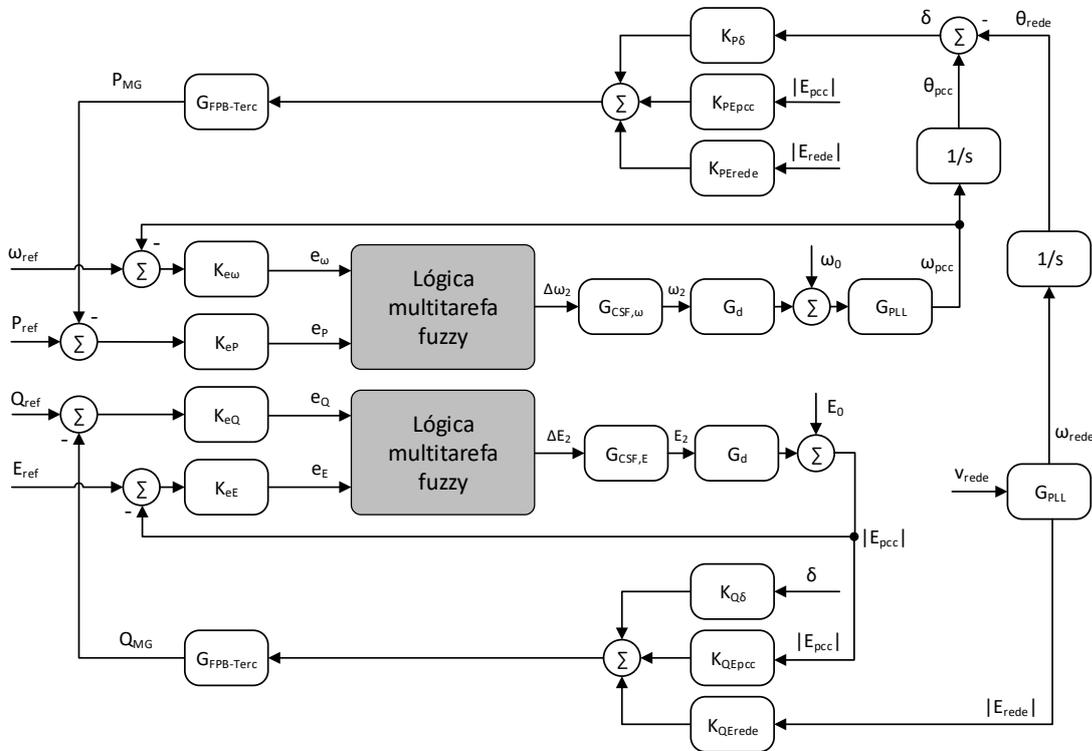
na qual

$$\begin{aligned} K_{P\delta} &= |E_{pcc,op}| |E_{rede,op}| \text{sen}(\theta_Z) / |Z|, \\ K_{PE_{pcc}} &= (2|E_{pcc,op}| - |E_{rede,op}|) \text{cos}(\theta_Z) / |Z|, \\ K_{PE_{rede}} &= -|E_{pcc,op}| \text{cos}(\theta_Z) / |Z|, \\ K_{Q\delta} &= -|E_{pcc,op}| |E_{rede,op}| \text{cos}(\theta_Z) / |Z|, \\ K_{QE_{pcc}} &= (2|E_{pcc,op}| - |E_{rede,op}|) \text{sen}(\theta_Z) / |Z|, \text{ e} \\ K_{QE_{rede}} &= -|E_{pcc,op}| \text{sen}(\theta_Z) / |Z|. \end{aligned}$$

Algumas considerações foram feitas para realizar o estudo de estabilidade com o controlador proposto. Primeiramente, para que o CSF atue sobre a microrrede não deve haver variações de frequência e tensão. Caso contrário, o ganho representado pelo CSF é zero, como se fosse uma malha aberta. A partir disso, é possível verificar o comportamento do CSF para cada combinação das entradas $[e_\omega, e_P, \%S_n, e_Q, e_E]$.

Outra consideração é fazer $\%S_n$ como “Vazio”. Desta maneira, podemos desacoplar as malhas de controle como mostra a Fig. 3.20. Tomando as entradas que dizem respeito à

Figura 3.20: Controle hierárquico da microrrede com o controlador multirefaza fuzzy desacoplado pelas considerações $d\omega$ e dE como “Quase zero” e $\%S_n$ para “Vazio”.

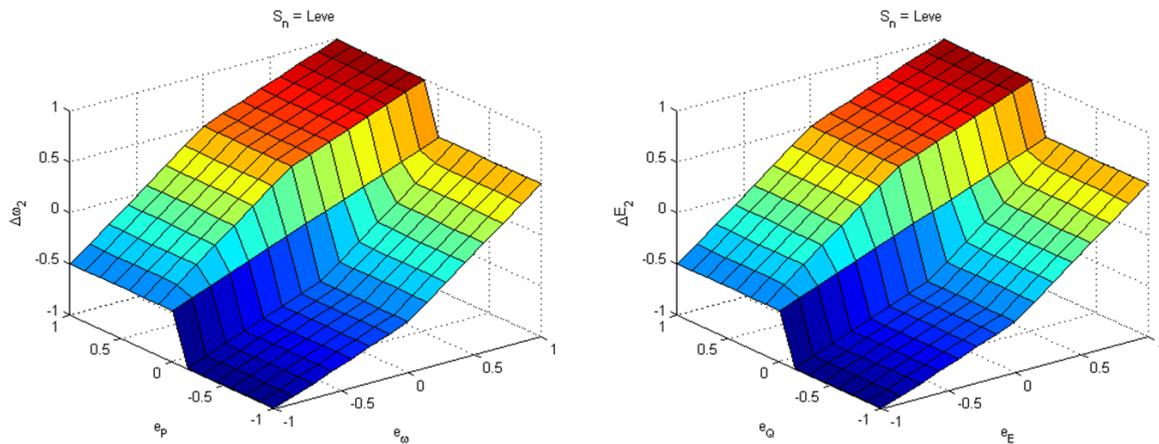


Fonte: Acervo pessoal.

curva do *droop* ω - P ($[e_\omega, e_P]$), a superfície fuzzy das combinações destas entradas e a saída

$\Delta\omega_2$ foi traçada e é exibida na Fig. 3.21. Da mesma forma, combinando as entradas que estão relacionadas com a curva E-Q, a superfície fuzzy com as entradas e a saída ΔE_2 foi traçada e também é apresentada na Fig. 3.21. Repare que as superfícies são equivalentes,

Figura 3.21: Superfícies fuzzy para $[e_\omega, e_p, \Delta\omega_2]$ e $[e_E, e_Q, \Delta E_2]$, adquirida a partir da consideração $d\omega$ e dE sendo “Quase zero” e $\%S_n$ como “Vazio”.



Fonte: Acervo pessoal.

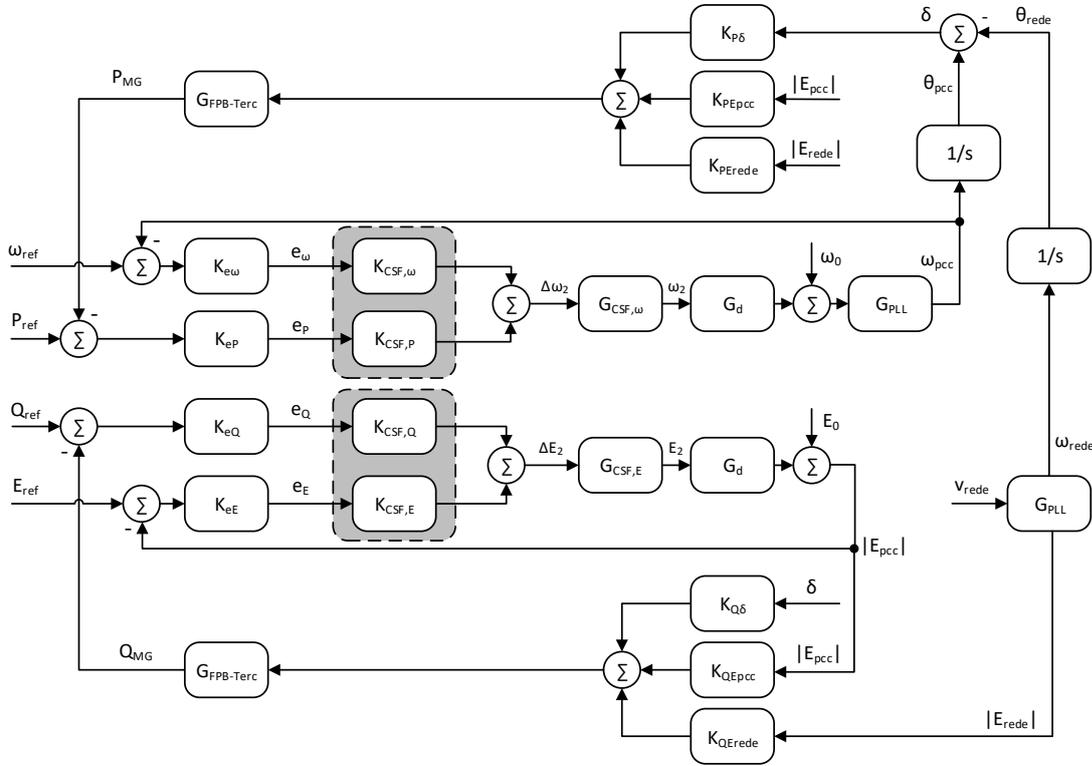
pois o comportamento do controlador quando $\%S_n$ é “Vazio” é o mesmo, como visto nas regras do CSF.

As superfícies fuzzy mostram que, dependendo da combinação das entradas, o ganho dado pelo CSF são alterados, sendo considerado como um ganho variável no controlador. Sendo assim, é possível encontrar um ganho para relacionar cada entrada com a respectiva saída. Portanto, a lógica multitarefa fuzzy pode ser substituída por ganhos e a saída seria a soma das duas entradas multiplicadas pelos seus respectivos ganhos, como mostra a Fig. 3.22. A partir da Figura 3.21, que possui a mesma forma para frequência e tensão e tomando uma entrada de cada vez, é possível estabelecer as faixas de ganho que a lógica multitarefa fuzzy atribui para cada entrada. A Figura 3.23 mostra a saída $\Delta\omega_2$ pela entrada e_ω e diferentes valores de e_p . Mapeando todos os pontos e fazendo a razão $K_{CSF,\omega} = \Delta\omega_2/e_\omega$ é possível calcular o ganho em cada ponto. A partir disso, valores de ganhos mínimo e máximo, $K_{CSF,\omega,\min}$ e $K_{CSF,\omega,\max}$, respectivamente, podem ser atribuídos como intervalo do ganho variável da lógica multitarefa fuzzy.

Pelo mesmo processo, o intervalo de valores do ganho $K_{CSF,p}$ também pode ser determinado. A Figura 3.24 mostra as curvas com as relações da saída $\Delta\omega_2$ pela entrada e_p e valores fixos de e_ω para cada uma.

Os intervalos de valores dos ganhos $K_{CSF,E}$ e $K_{CSF,Q}$ foram definidos da mesma forma. Primeiramente, fixando valores de e_Q e fazendo as razões $K_{CSF,E} = \Delta E_2/e_E$ e, depois, fixando os valores de e_E e calculando as relações $K_{CSF,Q} = \Delta E_2/e_Q$. Assim, foi possível definir os ganhos mínimos e máximos atribuídos ao CSF pela lógica multitarefas fuzzy.

Figura 3.22: Controle hierárquico da microrrede com a lógica multitarefa fuzzy representada pelos ganhos $K_{CSF,\omega}$, $K_{CSF,P}$, $K_{CSF,E}$ e $K_{CSF,Q}$.



Fonte: Acervo pessoal.

3.5.1 Modelagem dos ganhos do CSF como incerteza

Uma vez definidos os intervalos dos ganhos dados pela lógica multitarefa fuzzy é possível analisar a estabilidade da malha utilizando o controlador secundário fuzzy. Os ganhos dados pela lógica multitarefa fuzzy são modelados como incerteza multiplicativa como ilustra a Fig. 3.25, via transformação linear fracionária (LFT, das iniciais em inglês). A representação dos ganhos por incerteza multiplicativa é como segue:

$$K_{CSF,\omega} = K_{CSF,\omega,nom} + r_{CSF,\omega} \Delta_{CSF,\omega} \quad (3.15)$$

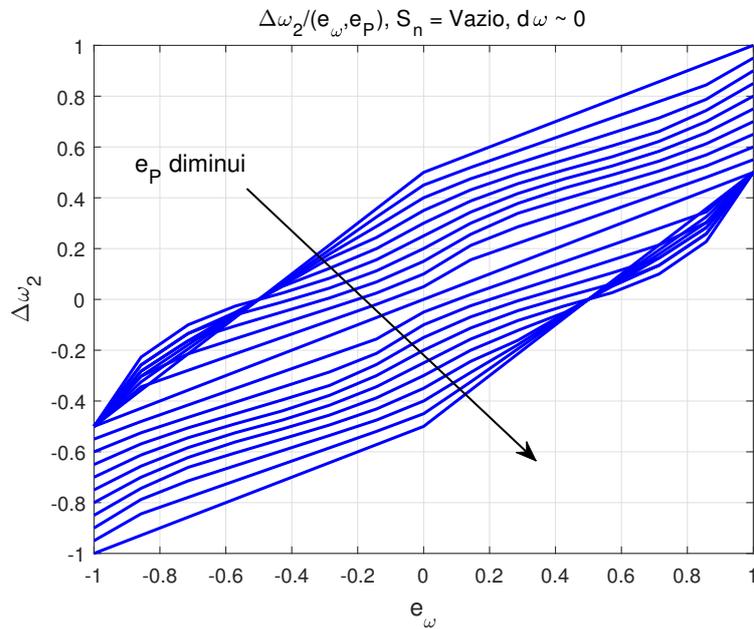
$$K_{CSF,P} = K_{CSF,P,nom} + r_{CSF,P} \Delta_{CSF,P} \quad (3.16)$$

$$K_{CSF,E} = K_{CSF,E,nom} + r_{CSF,E} \Delta_{CSF,E} \quad (3.17)$$

$$K_{CSF,Q} = K_{CSF,Q,nom} + r_{CSF,Q} \Delta_{CSF,Q} \quad (3.18)$$

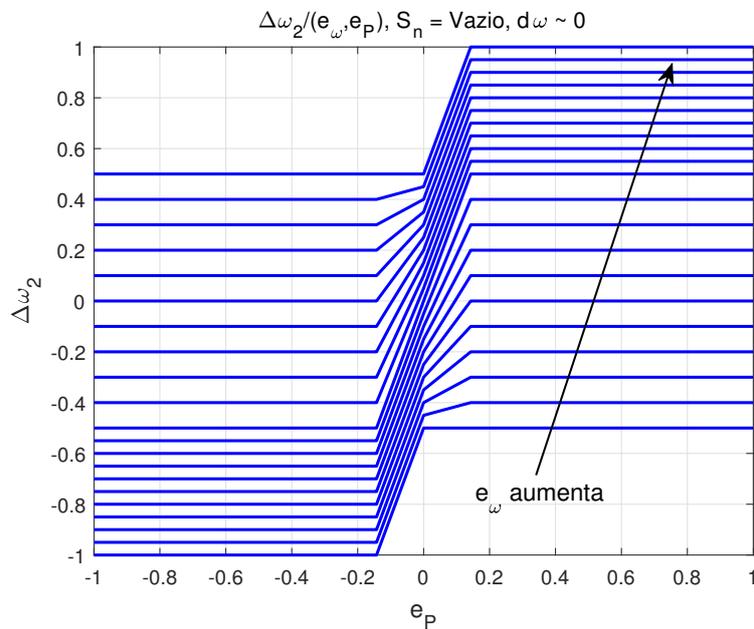
em que $K_{CSF,\omega,nom}$, $K_{CSF,P,nom}$, $K_{CSF,E,nom}$, $K_{CSF,Q,nom}$ são os valores médios dos respectivos ganhos do CSF e $r_{CSF,\omega}$, $r_{CSF,P}$, $r_{CSF,E}$, $r_{CSF,Q}$ são os pesos das incertezas correspondentes incluídos de forma a ter $|\Delta| \leq 1$. Os blocos correspondentes a cada incerteza descritos por LFT inferior são mostrados na Fig. 3.25.

Figura 3.23: Curvas com as relações entrada e saída da lógica fuzzy multitarefa para determinar a faixa do ganho $K_{CSF,\omega}$, a partir de valores de e_p fixos.



Fonte: Acervo pessoal.

Figura 3.24: Curvas com as relações entrada e saída da lógica fuzzy multitarefa para determinar a faixa do ganho $K_{CSF,P}$, a partir de valores de $e_ω$ fixos.



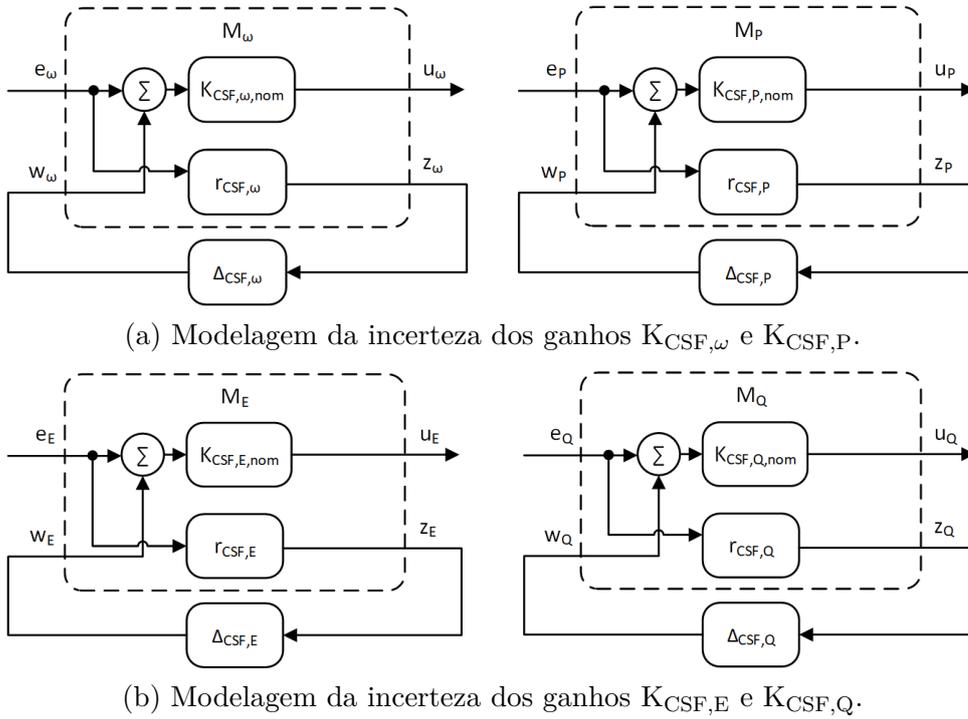
Fonte: Acervo pessoal.

Os ganhos nominais $K_{CSF,nom}$ são calculados por

$$K_{CSF,nom} = \frac{K_{CSF,min} + K_{CSF,máx}}{2}, \quad (3.19)$$

na qual $K_{CSF,min}$ e $K_{CSF,máx}$ são os extremos dos intervalos das incertezas, ganho mínimo

Figura 3.25: Incertezas dos ganhos da lógica multitarefa fuzzy descritas via transformação linear fracionária.



Fonte: Acervo pessoal.

e ganho máximo, respectivamente. Os pesos das incertezas dos ganhos do CSF, r_{CSF} , são calculados por

$$r_{CSF} = \frac{(K_{CSF,m\acute{a}x} - K_{CSF,min})}{(K_{CSF,min} + K_{CSF,m\acute{a}x})}, \quad (3.20)$$

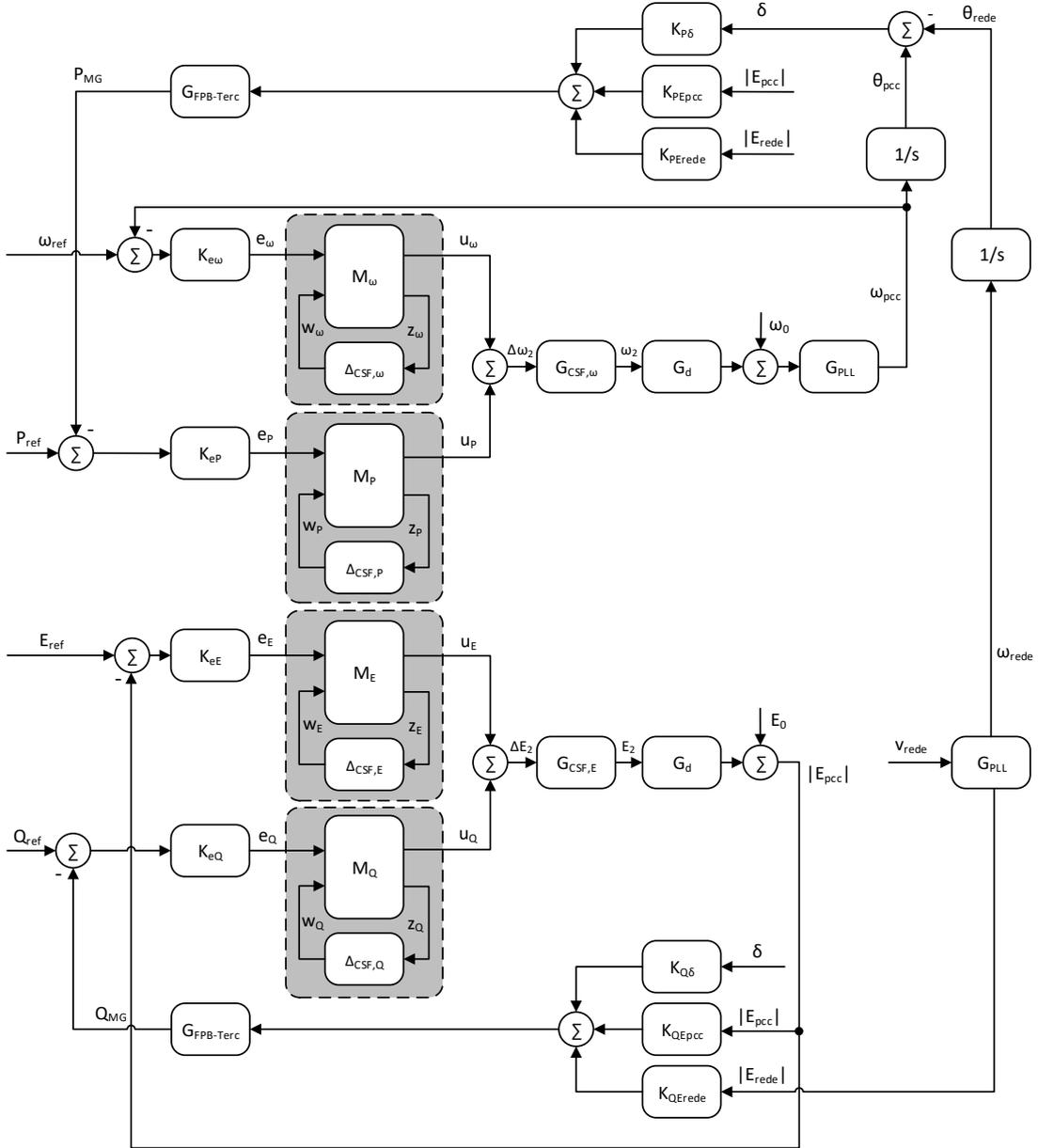
que também utiliza os ganhos mínimo e máximo.

Feitas as considerações e definidos os parâmetros que modelam a incerteza dos ganhos dados pela lógica multitarefa fuzzy, as malhas de controle com são mostradas na Fig. 3.26. As estruturas apresentadas na Fig. 3.25 foram substituídas pelas matrizes M_ω , M_p , M_E e M_Q que escrevem as relações entrada-saída com a inclusão da incerteza como realimentação. Desta forma, pode-se proceder com a análise da estabilidade destas malhas através da análise μ (SKOGESTAD; POSTLETHWAITE, 2007).

Análise μ -M

A estabilidade da malha de controle será verificada através da análise μ . O primeiro passo é transformar o sistema que terá a estabilidade verificado na forma 2 blocos-padrão ($M-\Delta_{CSF}$), como mostrado na Fig. 3.27. Assim, a partir da Fig. 3.26, fazendo as entradas ω_{ref} , P_{ref} , E_{ref} , Q_{ref} e V_{rede} iguais a zero, agrupando a malha de controle resultante dentro do bloco M e agrupando os blocos $\Delta_{CSF,\omega}$, $\Delta_{CSF,p}$, $\Delta_{CSF,E}$ e $\Delta_{CSF,Q}$ na forma de uma matriz diagonal Δ_{CSF} , a análise pode ser realizada.

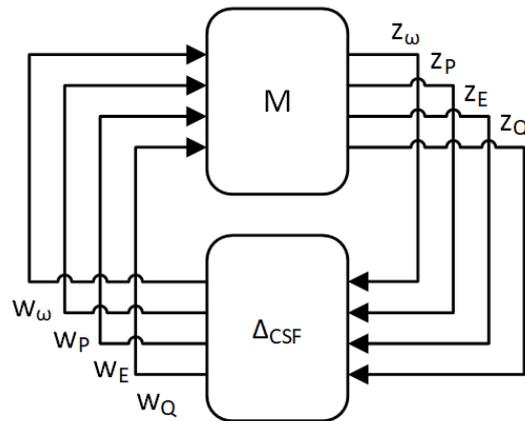
Figura 3.26: Controle hierárquico com o CSF representado por incertezas para análise da estabilidade.



Fonte: Acervo pessoal.

A análise μ consiste em encontrar o menor valor de perturbação para que o sistema analisado seja instável. Esse valor, μ , é dado pelo valor singular estruturado (SSV, do inglês structured singular value). De acordo com Skogestad e Postlethwaite (2007), seja M uma matriz complexa e seja $\Delta_{CSF} = \text{diag}(\Delta_{CSF,i})$ uma matriz de complexa com $\bar{\sigma}(\Delta_{CSF}) \leq 1$ em que $\bar{\sigma}$ denota valor singular máximo. A função real não negativa $\mu(M)$ é definida por

$$\mu(M) \triangleq \frac{1}{\min\{k_m \mid \det(I - k_m M \Delta_{CSF}) = 0, \bar{\sigma}(\Delta_{CSF}) \leq 1\}}. \quad (3.21)$$

Figura 3.27: Diagrama 2 blocos-padrão para realizar a análise μ .

Fonte: Acervo pessoal.

Um valor de $\mu(M) = 1$ significa que existe uma perturbação com $\bar{\sigma}(\Delta_{CSF}) = 1$ que pode tornar $(I - M\Delta_{CSF})$ singular. Quanto maior os valores de $\mu(M)$, pior, pois significa que menores perturbações podem tornar $(I - M\Delta_{CSF})$ singular. Por outro lado, quanto menor os valores de $\mu(M)$, melhor, pois o sistema é mais robusto (SKOGESTAD; POSTLETHWAITE, 2007).

Portanto, a análise de $\mu(M)$ pode ser suficiente para testar a estabilidade do sistema de controle incerto da Fig. 3.26. O resultado da análise é mostrado no Capítulo 4, assim como o local das raízes para alguns ganhos nas faixas de operação das incertezas.

Resultados de simulação

O funcionamento do controlador multitarefas é testado neste capítulo por meio de simulações. Comparações qualitativas serão feitas com o controlador hierárquico convencional para que as vantagens e desvantagens de ambos sejam discutidas. A microrrede será testada para operações convencionais, como operação isolada e conectada à rede de distribuição. Ainda, um teste durante a ocorrência de ilhamento não-intencional é feito para mostrar o comportamento dos controladores CHC e CSF.

Além de testar a estratégia de controle convencional e a proposta, serão feitas simulações com dois tipos diferentes de microrrede. A primeira, com as GDs baseadas em inversores e a segunda baseada em geradores síncronos. Esta separação foi feita pois os dois tipos de sistemas possuem inércias muito diferentes, sendo diferente a proposta de estrutura do CSF para os controladores de saída da inferência, como mostrado anteriormente.

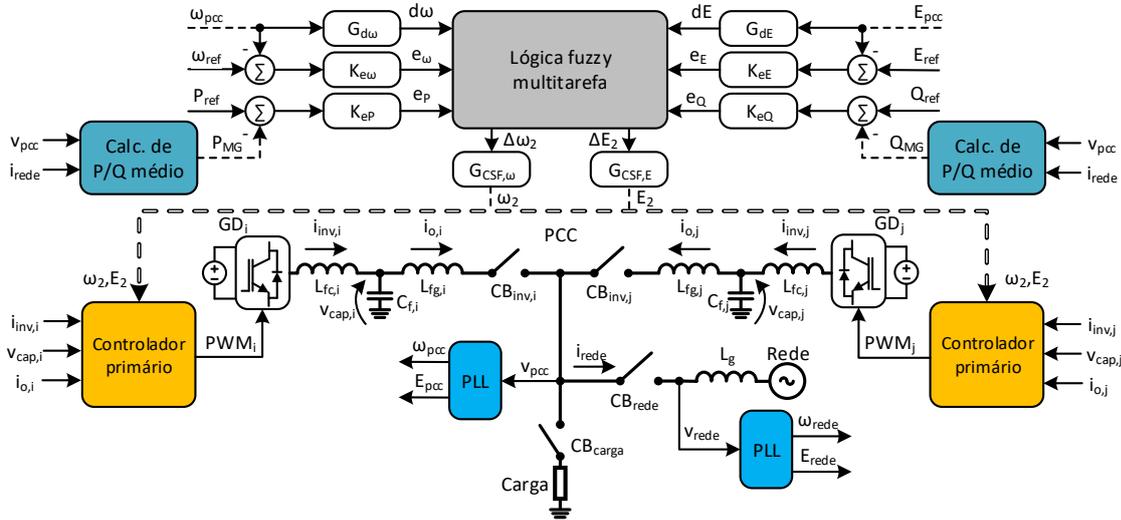
4.1 Descrição do sistema

A microrrede baseada em inversores possui a forma apresentada na Fig. 4.1. Composta de dois inversores operando em paralelo, a microrrede pode operar isolada ou conectada à rede de distribuição. Cada inversor trifásico possui um filtro LC de saída, responsáveis por atenuar os ruídos do chaveamento. Na saída de cada filtro LC é conectado um indutor com a função de acoplar a GD ao PCC.

Cada uma das GDs possui um controlador primário onde estão presentes os controladores de corrente no indutor L_{fc} e os controladores de tensão no capacitor C_f . Os controladores *droop* também estão no controlador primário, só necessitam de medições locais para compartilhar carga com as demais GDs. Além das GDs, a microrrede utilizada para simulação neste capítulo possui carga conectada ao PCC e um ponto de conexão com a rede de distribuição.

O controlador secundário proposto está representado na Fig. 4.1. Tanto para a estratégia utilizando os controladores hierárquicos convencionais, CHC, quanto o controlador

Figura 4.1: Diagrama geral da microrrede com dois inversores operando em paralelo e conectados à rede utilizando o controlador CSF proposto.



Fonte: Acervo pessoal.

multitarefa proposto, CSF, possuem o nível secundário. O nível terciário é representado na figura, mas apenas o CHC possui estes controladores. A Figura 4.2 mostra a estrutura do CHC com os níveis secundário e terciário. As sintonias dos controladores primário de ambas as estratégias e do CHC são apresentadas a seguir.

4.2 Sintonia dos controladores primários

O diagrama de blocos para a malha de controle de corrente no indutor do lado do inversor é mostrado na Fig. 4.3. A modelagem da GD foi feita em coordenadas dq com o intuito de controlar as variáveis a partir de controladores PI. As malhas modeladas em dq foram condensadas em blocos únicos com o índice dq. Os acoplamentos foram suprimidos dos diagramas, mas, foram considerados na simulação.

O bloco $G_{L_{fc}}$ representa o indutor por onde passa a corrente I_{inv}^{dq} , dado por

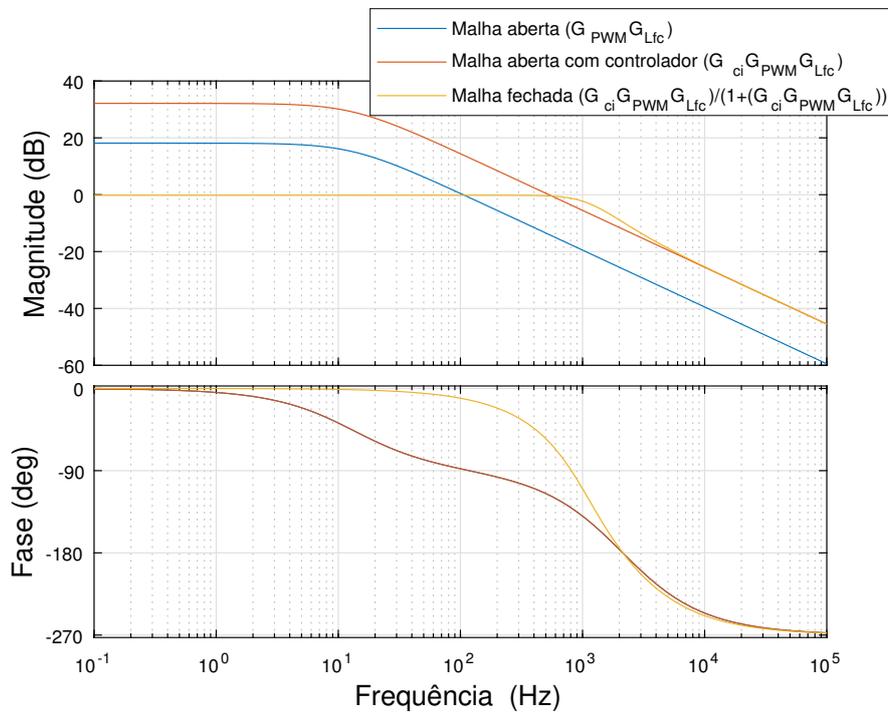
$$G_{L_{fc}} = \frac{1}{L_{fc}s + R_{L_{fc}}}, \quad (4.1)$$

na qual L_{fc} e $R_{L_{fc}}$ são os valores de indutância e resistência dos fios do indutor, respectivamente. O bloco G_{PWM} representa o PWM que faz o chaveamento dos IGBTs do inversor e foi modelado por um atraso de ganho unitário. Na sintonia dos controladores de corrente, este atraso foi aproximado por uma aproximação de Padé de primeira ordem, dado por:

$$G_{PWM} = e^{-T_{PWM}s} \approx \frac{2 - T_{PWM}s}{2 + T_{PWM}s}, \quad (4.2)$$

do inversor para que haja desacoplamento entre as dinâmicas das malhas. Sendo assim, o ganho proporcional de G_{ci} deve ser tal que a largura da banda de frequência da malha de corrente seja menor do que 1,6 kHz. Foi escolhido uma largura de banda de frequência de 1 kHz para a malha de corrente no indutor lado do inversor. A Figura 4.4 mostra a resposta em frequência da malha aberta de corrente com o controlador e da malha fechada. As funções de transferência são apresentadas no Apêndice A. Por causa do sinal negativo na função de transferência, os gráficos de fase do diagrama foram atrasadas 360° para iniciarem no 0° .

Figura 4.4: Diagrama de Bode da malha aberta do controle de corrente sem o controlador, com o controlador e de malha fechada (funções de transferência no Apêndice A).



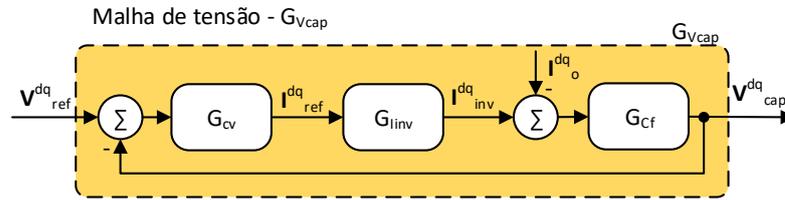
Fonte: Acervo pessoal.

Depois de sintonizada a malha de corrente G_{Inv} , os controladores da malha de tensão foram sintonizados. A Figura 4.5 mostra a malha de controle da tensão V_{cap}^{dq} , onde estão presentes os blocos G_{Inv} , que representa a malha de controle da corrente no indutor do lado do inversor, G_{cv} , o controlador de tensão. G_{Cf} representa o capacitor do filtro de saída da GD, definida por:

$$G_{Cf} = \frac{1}{C_f s}, \quad (4.3)$$

na qual C_f é o valor do capacitor. A resposta em frequência de malha aberta é apresentada na Fig. 4.6. Novamente, por causa do sinal negativo na função de transferência, os gráficos de fase do diagrama foram atrasadas 360° para iniciarem no 0° . É possível notar que no cruzamento da fase 180° , o ganho da resposta em malha aberta sem o controlador é maior

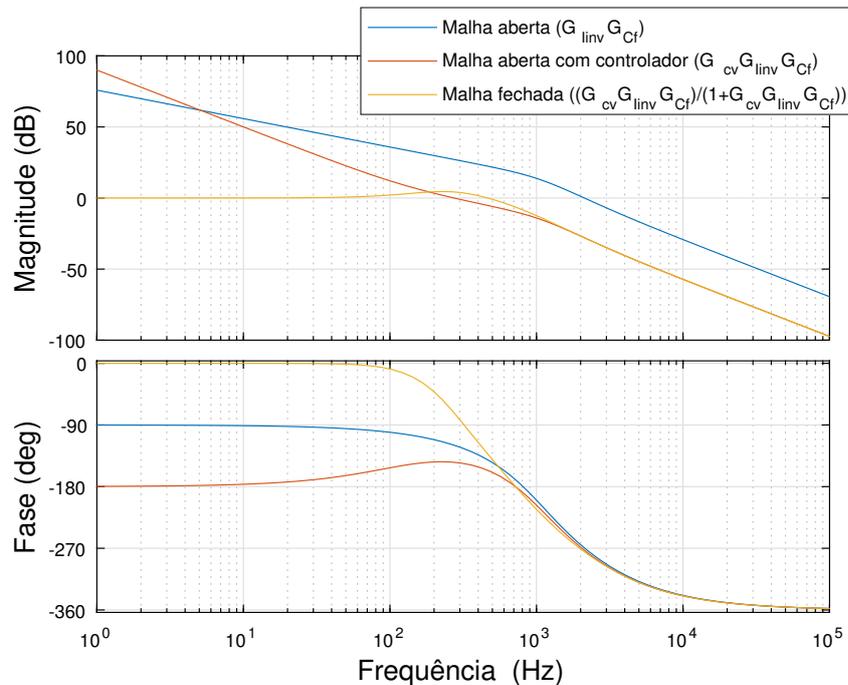
Figura 4.5: Malha de controle da tensão no capacitor do filtro de saída da GD.



Fonte: Acervo pessoal.

do que 0 dB. Com isso, o ganho escolhido para o controlador de tensão deve ser menor do que 1. Outro ponto a ser considerado é a frequência de corte da malha de controle. Seguindo a recomendação de Buso e Mattavelli (2015), a largura de banda de frequência da malha de controle de tensão deve ser menor do que 166,6 Hz. Diferentemente do controlador de corrente G_{ci} , o G_{cv} deve zerar o erro de regime de tensão. Assim, uma estrutura PI foi escolhida para G_{cv} . O ganho integral foi escolhido na tentativa de que o zero do PI cancelasse um dos pólos da malha de controle de tensão. A partir disso, foram escolhidos os ganhos do controlador. Os ganhos dos controladores G_{ci} e G_{cv} são

Figura 4.6: Diagrama de Bode da malha aberta do controle de tensão sem o controlador, com o controlador e de malha fechada (funções de transferência no Apêndice A).



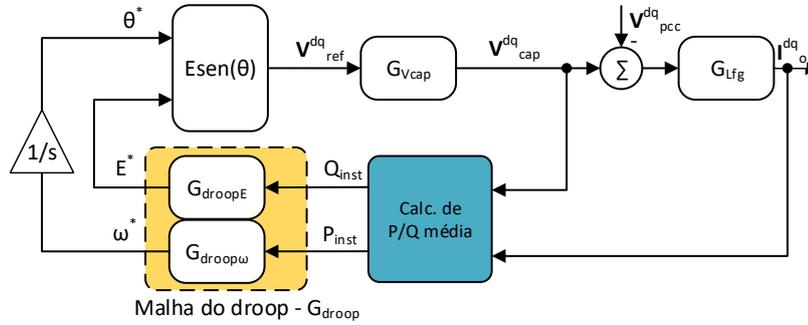
Fonte: Acervo pessoal.

apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Ganhos dos controladores primários

Ganho	Valor
$K_{P,i}$	5
$K_{P,v}$	0,04
$K_{I,v}$	32

A capacidade de compartilhamento de cargas é atribuída ao controlador *droop* adicionado a malha dos controladores primários. A Figura 4.7 mostra a posição dos controladores *droop* na malha de controle primário. O bloco G_{Lfg} representa o modelo do indutor

Figura 4.7: Malhas de controle dos inversores com o controlador *droop*.

Fonte: Acervo pessoal.

de acoplamento da GD ao PCC, modelado como

$$G_{Lfg} = \frac{1}{L_{fg}s + R_{Lfg}}. \quad (4.4)$$

A corrente I_o^{dq} e a tensão V_{cap}^{dq} são utilizadas para calcular a potência instantânea fornecida pela GD. Sendo assim, as potências ativa e reativa são calculadas por:

$$P_{inst} = 3/2(V_{cap}^d I_o^d + V_{cap}^q I_o^q) \quad (4.5)$$

e

$$Q_{inst} = 3/2(V_{cap}^d I_o^q - V_{cap}^q I_o^d), \quad (4.6)$$

nos quais o termo $3/2$ vem da transformação dq de amplitude constante. Os filtros de potência G_{FPB-PQ} extraem as componentes médias das potências ativa e reativa instantâneas e atualizam a lei de controle do *droop*. A frequência de corte dos filtros de potência dita a dinâmica dos controladores *droop* e foi escolhida como 10 Hz, suficiente para desacoplar esta dinâmica da dinâmica de G_{Vcap} . Os blocos $G_{droop\omega}$ e G_{droopE} são definidos como:

$$G_{droop\omega} = -m \frac{2\pi f_{droop}}{s + 2\pi f_{droop}} \quad (4.7)$$

e

$$G_{\text{droopE}} = -n \frac{2\pi f_{\text{droop}}}{s + 2\pi f_{\text{droop}}}, \quad (4.8)$$

nos quais m e n são os coeficientes de inclinação da curva do *droop*. Os coeficientes foram configurados para 1% em ambos os casos, ou seja, quando a GD estiver fornecendo 1 pu de potência ativa/reactiva, haverá um desvio de 1% na frequência/tensão. Os controladores *droop* recebem os sinais dos controladores secundários para corrigir os desvios de tensão e frequência. A seguir, as malhas de controle secundário são discutidas.

4.3 Sintonia e análise dos controladores hierárquicos convencionais

Através dos links de comunicação de banda estreita, os controladores secundários se comunicam com as GDs pertencentes à microrrede controlada. Desta forma, a microrrede pode operar com compartilhamento de cargas entre as GDs e sem os desvios de frequência e tensão, de maneira isolada da rede de distribuição. Caso a microrrede seja conectada, o controle de potência deve ser feito pelo nível terciário conectado ao nível secundário.

4.3.1 Sintonia dos controladores secundários

Os controladores secundários devem regular a frequência e a tensão no PCC da microrrede, rejeitando os desvios causados pelos controladores *droop*. A Figura 4.8 apresenta as duas malhas de controle que compõem o nível secundário do CHC.

A malha de controle secundária de tensão possui um G_{PLL} que extrai a frequência da tensão do PCC. Este sinal é realimentado e comparado com o sinal ω_{ref} para gerar o erro que deve ser zerado pelo controlador $G_{\text{c}\omega\text{sec}}$. O bloco G_d representa o atraso causado pela comunicação de banda estreita e foi modelado como um filtro passa-baixa com constante de tempo de 10 ms. O controlador *droop* foi representado pelo bloco $G_{\text{droop}\omega}$ que, por sua vez, recebe o sinal da potência instantânea. A saída desta malha é a referência de frequência da tensão que os inversores das GDs devem sintetizar (a mesma saída do *droop*). O mesmo acontece para o controlador secundário de tensão, porém o controlador G_{cEsec} deve rejeitar os distúrbios causados pelo compartilhamento de potência reativa.

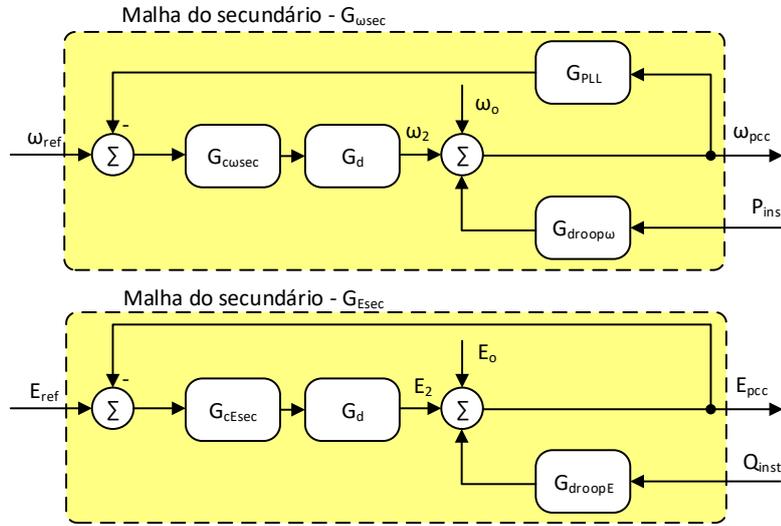
A partir dos diagramas de blocos da Fig. 4.8, as funções de transferências das malhas de controle secundário obtidas foram

$$\omega_{\text{pcc}} = \omega_0 + \omega_2 + G_{\text{droop}\omega} P_{\text{inst}} \quad (4.9)$$

e

$$E_{\text{pcc}} = E_0 + E_2 + G_{\text{droopE}} Q_{\text{inst}}. \quad (4.10)$$

Figura 4.8: Malhas de controle secundário de frequência e de tensão.



Fonte: Acervo pessoal.

Rearranjando, tem-se:

$$\omega_{pcc} = \frac{\omega_0 + G_{cwsec}G_d\omega_{ref} + G_{droop\omega}P_{inst}}{1 + G_{cwsec}G_dG_{PLL}} \quad (4.11)$$

e

$$E_{pcc} = \frac{E_0 + G_{cEsec}G_dE_{ref} + G_{droopE}Q_{inst}}{1 + G_{cEsec}G_d}. \quad (4.12)$$

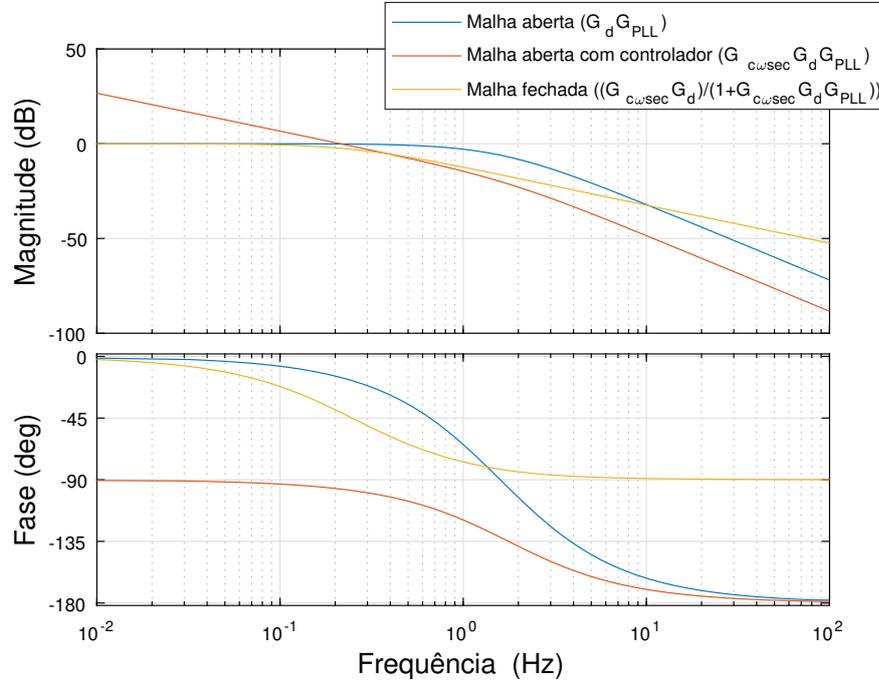
As Figuras 4.9 e 4.10 mostram as respostas em frequência de malha aberta para o nível secundário do CHC, sendo a função de transferência da malha aberta de frequência dada por G_dG_{PLL} e de tensão por G_d . O intuito da sintonia dos controladores secundários é ser dez vezes mais lentos do que o filtro de potência do droop e ser capaz de rejeitar os distúrbios na tensão e na frequência.

Escolhendo os ganhos apresentados na Tabela 4.2, as respostas em frequência das malhas do nível secundário com os controladores e das malhas fechadas foram traçadas e também são apresentadas nas Figs. 4.9 e 4.10. As respostas em frequência das malhas fechadas foram traçadas para $\omega_{pcc}/\omega_{ref}$ e E_{pcc}/E_{ref} . É possível notar que a largura da banda de frequência, para ambas as malhas, ficou em torno de 1 Hz.

A rejeição dos distúrbios foi verificada através das respostas em frequência para as entradas P_{inst} e Q_{inst} , em relação às saídas ω_{pcc} e E_{pcc} , e é exibida na Fig. 4.11. A menor atenuação destes sinais ocorre próximo à 1 Hz, frequência de corte dos controladores, com o ganho próximo a -40 dB.

Se o objetivo da microrrede for operar conectada, o chaveamento de controladores terciários deve ser feito para que não haja conflitos na hora de controlar as variáveis do PCC. As sintonias do nível terciário são mostradas a seguir.

Figura 4.9: Diagrama de Bode da malha aberta do controle de frequência secundário sem o controlador, com o controlador e de malha fechada (funções de transferência no Apêndice A).



Fonte: Acervo pessoal.

Tabela 4.2: Ganhos dos controladores secundários

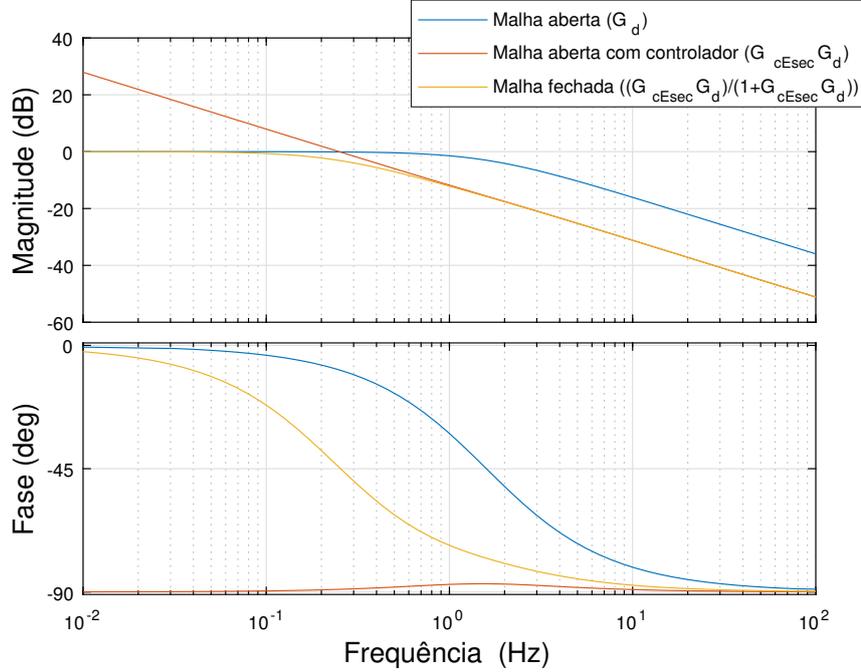
Ganho	Valor
$K_{P,Sec,\omega}$	0,150
$K_{I,Sec,\omega}$	1,350
$K_{P,Sec,E}$	0,175
$K_{I,Sec,E}$	1,575

4.3.2 Sintonia dos controladores terciários

A potência injetada na rede de distribuição deve ser controlada pelo nível terciário do CHC. As malhas de controle das potências ativa e reativa são apresentadas na Fig. 4.12. Da inspeção das malhas de controle terciário, é possível extrair as relações:

$$\begin{aligned}\omega_3 &= G_{cPTerc}(P_{ref} - P_{MG}), \\ \omega_{pcc} &= G_{\omega sec}(\omega_0 + \omega_3), \\ \theta_{pcc} &= G_{PLL}/s\omega_{pcc}, \text{ e} \\ P_{MG} &= G_{FPB-Terc}(K_{P\delta}(\theta_{pcc} - \theta_{rede}) + K_{PE_{pcc}}|E_{pcc}| + K_{PE_{rede}}|E_{rede}|)\end{aligned}$$

Figura 4.10: Diagrama de Bode da malha aberta do controle de tensão secundário sem o controlador, com o controlador e de malha fechada (funções de transferência no Apêndice A).



Fonte: Acervo pessoal.

e

$$\begin{aligned}
 E_3 &= G_{cQTerc}(Q_{ref} - Q_{MG}), \\
 E_{pcc} &= G_{Esec}(E_0 + E_3), \text{ e} \\
 Q_{MG} &= G_{FPB-Terc}(K_Q\delta(\theta_{pcc} - \theta_{rede}) + K_{QE_{pcc}}|E_{pcc}| + K_{QE_{rede}}|E_{rede}|).
 \end{aligned}$$

Rearranjando as equações, tem-se:

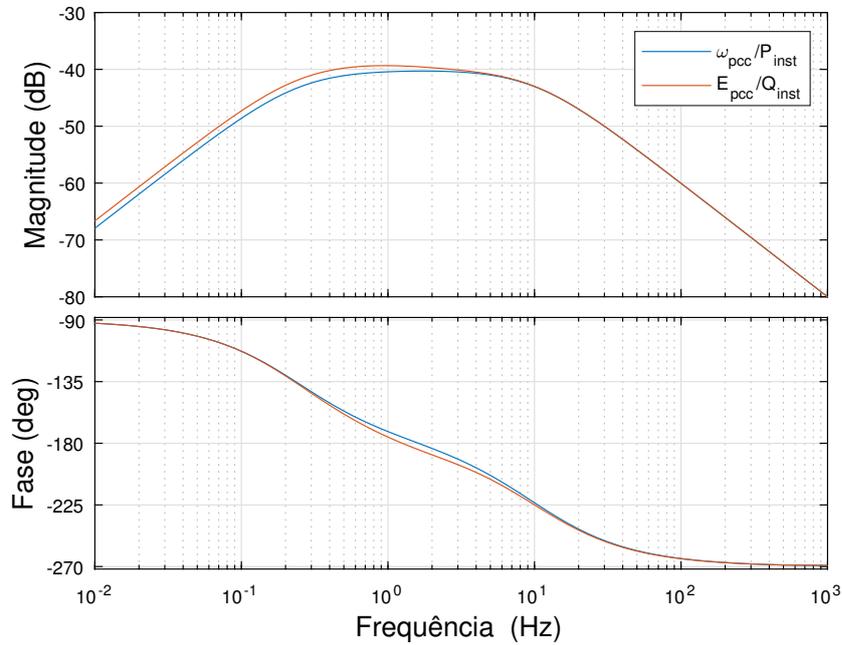
$$\begin{aligned}
 P_{MG} &= \frac{G_{FPB-Terc}K_{P\delta}G_{PLL}G_{\omega sec}G_{cPTerc}/s}{1 + G_{FPB-Terc}K_{P\delta}G_{PLL}G_{\omega sec}G_{cPTerc}/s} P_{ref} \\
 &+ \frac{G_{FPB-Terc}K_{P\delta}(G_{PLL}/sG_{\omega sec}\omega_0 - \theta_{rede})}{1 + G_{FPB-Terc}K_{P\delta}G_{PLL}G_{\omega sec}G_{cPTerc}/s} \\
 &+ \frac{G_{FPB-Terc}(K_{PE_{pcc}}|E_{pcc}| + K_{PE_{rede}}|E_{rede}|)}{1 + G_{FPB-Terc}K_{P\delta}G_{PLL}G_{\omega sec}G_{cPTerc}/s}
 \end{aligned} \quad (4.13)$$

e

$$\begin{aligned}
 Q_{MG} &= \frac{G_{FPB-Terc}G_{Esec}(K_{QE_{pcc}}G_{cQTerc}Q_{ref} + K_{QE_{pcc}}E_0)}{1 + G_{FPB-Terc}K_{QE_{pcc}}G_{Esec}G_{cQTerc}} \\
 &+ \frac{G_{FPB-Terc}(K_{QE_{rede}}|E_{rede}| + K_Q\delta(\theta_{pcc} - \theta_{rede}))}{1 + G_{FPB-Terc}K_{QE_{pcc}}G_{Esec}G_{cQTerc}}.
 \end{aligned} \quad (4.14)$$

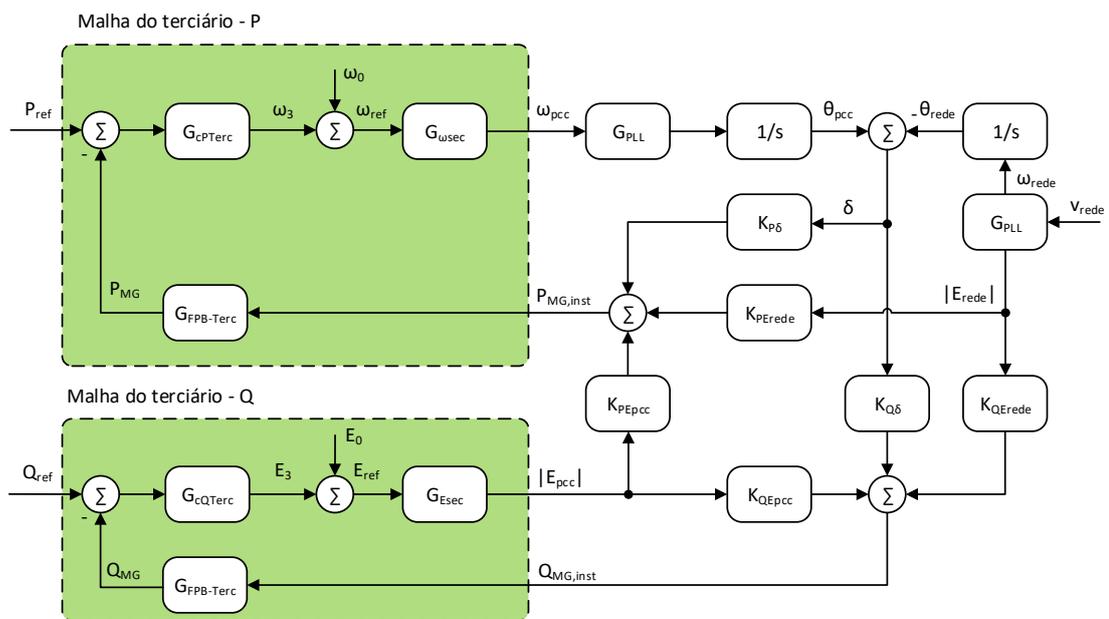
Os controladores G_{cPTerc} e G_{cQTerc} são os controladores das malhas de controle terciárias. Os blocos $G_{\omega sec}$ e G_{Esec} representam as malhas de controle secundário do CHC que

Figura 4.11: Diagrama de Bode para a rejeição das perturbações causadas pelos *droop* de frequência (ω_{pcc}/P_{inst}) e tensão (E_{pcc}/Q_{inst} , funções de transferência no Apêndice A).



Fonte: Acervo pessoal.

Figura 4.12: Malhas de controle terciário de potência ativa e reativa.

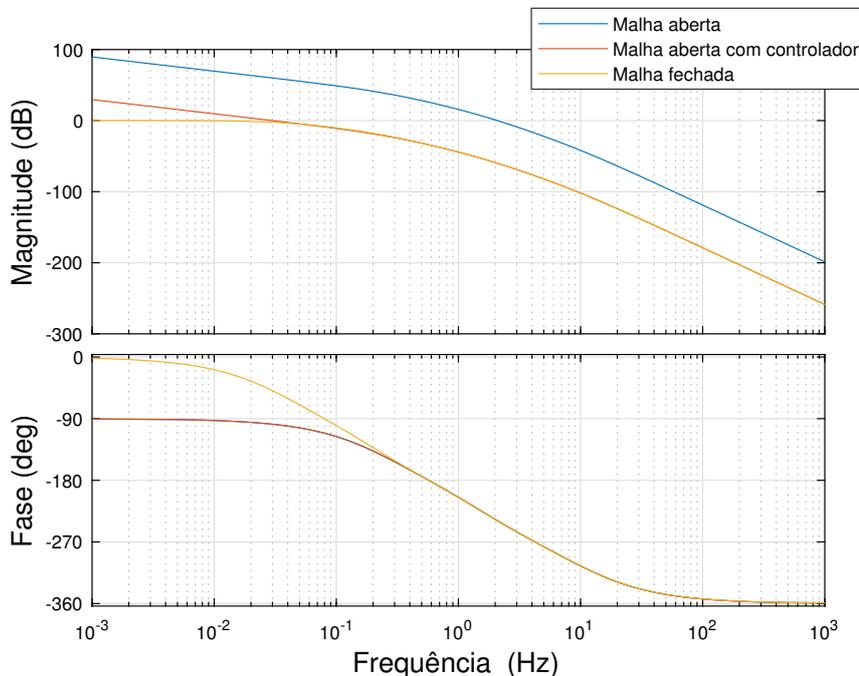


Fonte: Acervo pessoal.

estão em série com os controladores terciários. Na malha de frequência, ω_{pcc} é extraído por um PLL e integrado para se tornar θ_{pcc} . A diferença entre a fase da tensão do PCC e da rede (θ_{rede}) geram o sinal δ que passa pelo ganho $K_{P\delta}$ e é somada às parcelas $K_{PE_{pcc}}|E_{pcc}|$ e $K_{PE_{rede}}|E_{rede}|$ para estimar a potência ativa injetada na rede. A potência reativa é estimada pela soma de $K_{Q\delta}\delta$, $K_{QE_{pcc}}|E_{pcc}|$ e $K_{QE_{rede}}|E_{rede}|$. Os ganhos $K_{P\delta}$, $K_{PE_{pcc}}$, $K_{PE_{rede}}$, $K_{Q\delta}$, $K_{QE_{pcc}}$ e $K_{QE_{rede}}$ são os mesmos do resultado da linearização (3.14). Os filtros de potência $G_{FPB-Terc}$ foram ajustados na mesma velocidade dos filtros de potência do *droop* (100 ms).

As Figuras 4.13 e 4.14 mostram os diagramas de Bode para as malhas de controle terciário do CHC. A função de transferência de malha aberta para potência ativa é dada por $G_{FPB-Terc}K_{P\delta}G_{PLL}G_{wsec}/s$ e de potência reativa por $G_{FPB-Terc}K_{QE_{pcc}}G_{Esec}$. Como a malha de controle da potência ativa possui um integrador, optou-se por utilizar um controlador proporcional. O controlador G_{cPTerc} é capaz de eliminar o erro de regime com a ajuda do integrador e a função de transferência de malha fechada é dada pela relação P_{MG}/P_{ref} .

Figura 4.13: Diagrama de Bode da malha aberta do controle de potência ativa terciário sem o controlador, com o controlador e de malha fechada (funções de transferência no Apêndice A).

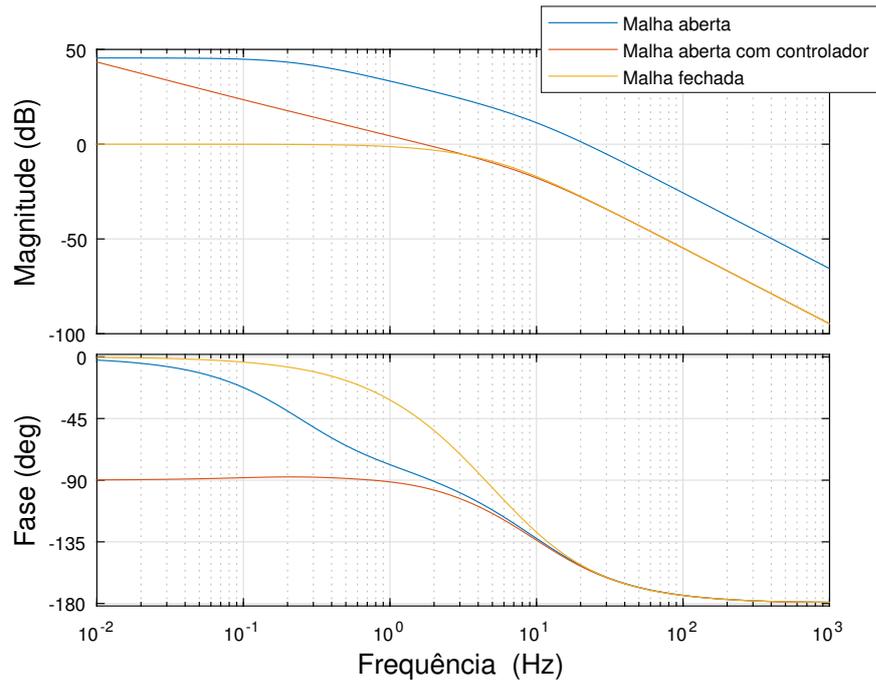


Fonte: Acervo pessoal.

A topologia do controlador de tensão G_{cQTerc} escolhida foi um PI. Os critérios para escolha dos ganhos proporcionais de ambos os controladores foi manter a largura da banda de frequência em torno de 0,1 Hz. Para o ganho integral de G_{cQTerc} , tentar cancelar um

polo da malha com a alocação do zero do PI. A função de transferência de malha fechada, neste caso, é dada pela relação Q_{MG}/Q_{ref} . Os ganhos dos controladores terciários do CHC são mostrados na Tabela 4.3.

Figura 4.14: Diagrama de Bode da malha aberta do controle de potência reativa terciário sem o controlador, com o controlador e de malha fechada (funções de transferência no Apêndice A).



Fonte: Acervo pessoal.

Tabela 4.3: Ganhos dos controladores terciários

Ganho	Valor
$K_{P, Ter, P}$	0,002
$K_{P, Ter, E}$	1,0
$K_{I, Ter, E}$	1,4

4.4 Análise do controlador proposto

O controlador multitarefa secundário fuzzy é analisado a partir da discussão da Seção 3.5. Uma verificação dos lugares das raízes da malha de controle da Fig. 3.22 é realizada, utilizando os valores nominais dos ganhos com incerteza. Não sendo suficiente, os resultados da análise $\mu(M)$ são apresentados adiante.

4.4.1 Casos típicos da operação via lugar das raízes

A partir da Figura 3.22, é possível extrair as funções de transferência entre as entradas e as saídas das malhas de controle. As equações da malha de controle de frequência e potência ativa são dadas por:

$$\begin{aligned} \omega_{pcc} = & G_{PLL}(\omega_0 + G_d G_{CSF,\omega} (K_{CSF,\omega} K_{e\omega} (\omega_{ref} - \omega_{pcc}) \\ & + K_{CSF,p} K_{e\omega} (P_{ref} - P_{MG}))) \end{aligned} \quad (4.15)$$

$$P_{MG} = G_{FPB-Terc} (K_{P\delta} (\omega_{pcc}/s - \theta_{rede}) + K_{PE_{pcc}} |E_{pcc}| + K_{PE_{rede}} |E_{rede}|). \quad (4.16)$$

A partir de (4.15) e (4.16), chega-se em:

$$\begin{aligned} \omega_{pcc} = & s G_{PLL} \left(\frac{\omega_0 + G_{CSF,\omega} G_d K_{CSF,\omega} K_{e\omega} \omega_{ref} + K_{CSF,p} K_{eP} P_{ref}}{D_{\omega_{pcc}}} \right. \\ & - \frac{G_{CSF,\omega} G_d G_{FPB-Terc} K_{CSF,p} K_{eP} (K_{PE_{pcc}} |E_{pcc}| + K_{PE_{rede}} |E_{rede}|)}{D_{\omega_{pcc}}} \\ & \left. + \frac{G_{CSF,\omega} G_d G_{FPB-Terc} K_{CSF,p} K_{P\delta} K_{eP} \theta_{rede}}{D_{\omega_{pcc}}} \right) \end{aligned} \quad (4.17)$$

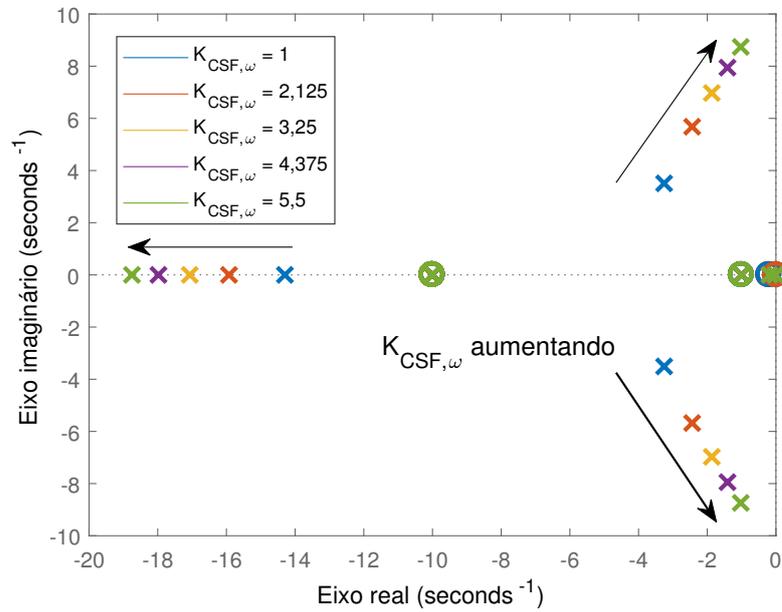
$$\begin{aligned} P_{MG} = & \frac{G_{FPB-Terc} G_{PLL} K_{P\delta} (\omega_0 + G_{CSF,\omega} G_d K_{CSF,\omega} K_{e\omega} \omega_{ref})}{D_{\omega_{pcc}}} \\ & + \frac{G_{CSF,\omega} G_d G_{FPB-Terc} G_{PLL} K_{CSF,p} K_{P\delta} K_{eP} P_{ref}}{D_{\omega_{pcc}}} \\ & + \frac{G_{FPB-Terc} K_{PE_{pcc}} s (G_{CSF,\omega} G_d G_{PLL} K_{CSF,\omega} K_{e\omega} + 1)}{D_{\omega_{pcc}}} |E_{pcc}| \\ & + \frac{G_{FPB-Terc} K_{PE_{rede}} s (G_{CSF,\omega} G_d G_{PLL} K_{CSF,\omega} K_{e\omega} + 1)}{D_{\omega_{pcc}}} |E_{rede}| \\ & - \frac{G_{FPB-Terc} K_{P\delta} s (G_{CSF,\omega} G_d G_{PLL} K_{CSF,\omega} K_{e\omega} + 1)}{D_{\omega_{pcc}}} \theta_{rede} \end{aligned} \quad (4.18)$$

na qual $D_{\omega_{pcc}} = s + G_{CSF,\omega} G_d G_{PLL} (K_{CSF,\omega} K_{e\omega} s + G_{FPB-Terc} K_{CSF,p} K_{P\delta} K_{eP})$. Daqui, é possível encontrar as relações das saídas ω_{pcc} e P_{MG} com as entradas dessa malha de controle.

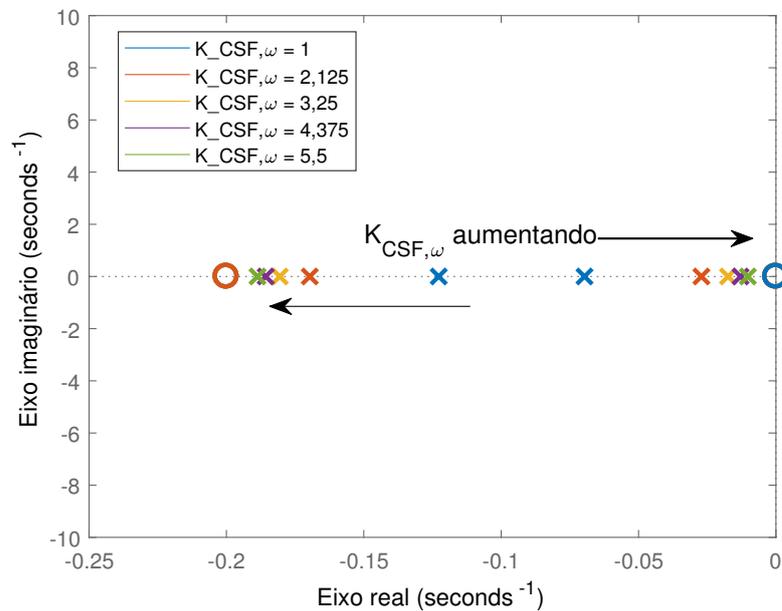
As localizações dos pólos de malha fechada para o controle de frequência são mostradas na Fig. 4.15. Ao ganho $K_{CSF,p}$ foi atribuído o valor $K_{CSF,p,nom}$ para determinar como os pólos se movimentam com a variação de $K_{CSF,\omega}$ na faixa da incerteza. Todos os pólos estão localizados no semiplano esquerdo do eixo real. Os zeros mostrados são em relação à entrada ω_{ref} .

A malha de controle da potência ativa foi fechada e seus pólos são exibidos na Fig. 4.16. Dessa vez, o ganho $K_{CSF,\omega}$ foi escolhido sendo o $K_{CSF,\omega,nom}$ e o ganho $K_{CSF,p}$ foi variado na faixa da incerteza.

Figura 4.15: Lugar das raízes para a malha de controle de frequência para $K_{CSF,P} = K_{CSF,P,nom}$ e diferentes valores de $K_{CSF,\omega}$.



(a) Todos os polos e zeros.

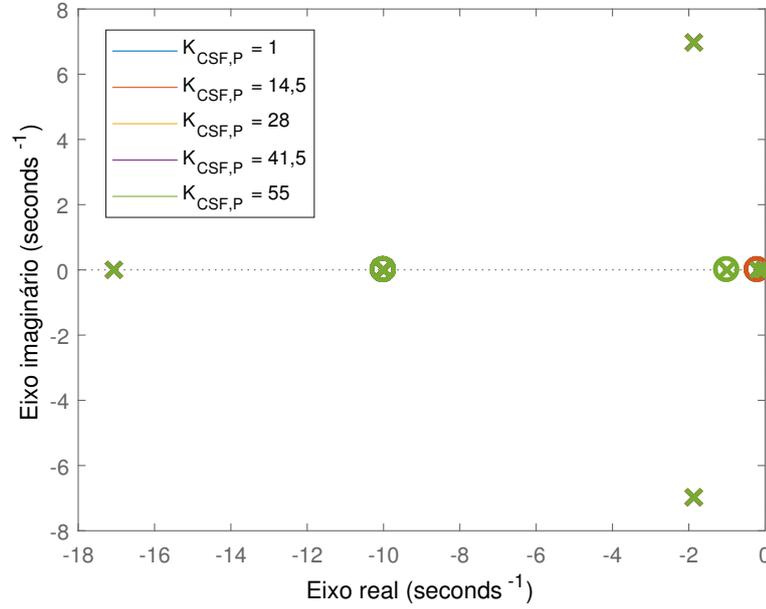


(b) Detalhe para os elementos próximos ao eixo imaginário.

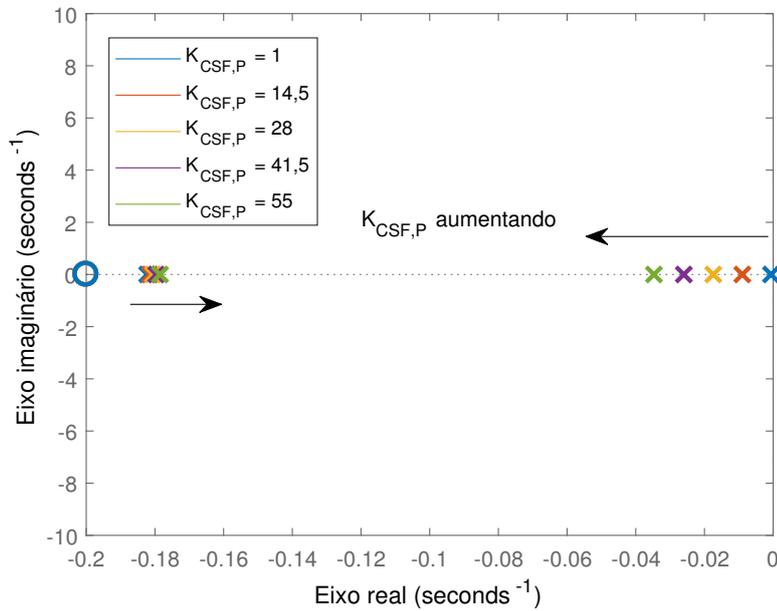
Fonte: Acervo pessoal.

O equacionamento também pode ser feito para a malha de controle de tensão e potência

Figura 4.16: Lugar das raízes para a malha de controle de potência ativa para $K_{CSF,\omega} = K_{CSF,\omega,nom}$ e diferentes valores de $K_{CSF,P}$.



(a) Todos os polos e zeros.



(b) Detalhe para os elementos próximos ao eixo imaginário.

Fonte: Acervo pessoal.

reativa. As equações são dadas por:

$$|E_{pcc}| = E_0 + G_d G_{CSF,E} (K_{CSF,E} K_{eE} (E_{ref} - |E_{pcc}|) + K_{CSF,Q} K_{eQ} (Q_{ref} - Q_{MG})) \quad (4.19)$$

$$Q_{MG} = G_{FPB-Terc} (K_{QE_{pcc}} |E_{pcc}| + K_{QE_{rede}} |E_{rede}| + K_{Q\delta} \delta). \quad (4.20)$$

Rearranjando as equações e isolando os termos $|E_{pcc}|$ e Q_{MG} , tem-se:

$$\begin{aligned}
|E_{pcc}| &= \frac{E_0 + G_{CSF,E}G_dK_{eE}K_{CSF,E}E_{ref}}{D_{E_{pcc}}} \\
&+ \frac{G_{CSF,E}G_dK_{eQ}K_{CSF,Q}Q_{ref}}{D_{E_{pcc}}} \\
&- \frac{G_{CSF,E}G_dG_{FPB-Terc}K_{CSF,Q}K_{QE_{rede}}K_{eQ}}{D_{E_{pcc}}}|E_{rede}| \\
&- \frac{G_{CSF,E}G_dG_{FPB-Terc}K_{CSF,Q}K_{Q\delta}K_{eQ}}{D_{E_{pcc}}}\delta
\end{aligned} \tag{4.21}$$

$$\begin{aligned}
Q_{MG} &= \frac{G_{FPB-Terc}K_{QE_{pcc}}E_0}{D_{E_{pcc}}} \\
&+ \frac{G_{FPB-Terc}G_{CSF,E}G_dK_{CSF,E}K_{QE_{pcc}}K_{eE}}{D_{E_{pcc}}}E_{ref} \\
&+ \frac{G_{FPB-Terc}K_{QE_{rede}}(1 + G_{CSF,E}G_dK_{CSF,E}K_{eE})}{D_{E_{pcc}}}|E_{rede}| \\
&+ \frac{G_{FPB-Terc}G_{CSF,E}G_dK_{CSF,Q}K_{QE_{pcc}}K_{eQ}}{D_{E_{pcc}}}Q_{ref} \\
&+ \frac{G_{FPB-Terc}K_{Q\delta}(1 + G_{CSF,E}G_dK_{CSF,E}K_{eE})}{D_{E_{pcc}}}\delta,
\end{aligned} \tag{4.22}$$

na qual $D_{E_{pcc}} = (G_{CSF,E}G_dK_{CSF,E}K_{eE} + G_{CSF,E}G_dG_{FPB-Terc}K_{CSF,Q}K_{QE_{pcc}}K_{eQ} + 1)$. O lugar das raízes para (4.21), assumindo $E_0 = 0$, $|E_{rede}| = 0$, $Q_{ref} = 0$ e $\delta = 0$, é apresentado na Fig. 4.17. Todos os pólos de malha fechada se encontram no lado esquerdo do semiplano real. Os zeros plotados são os zeros em relação à entrada $|E_{ref}|$.

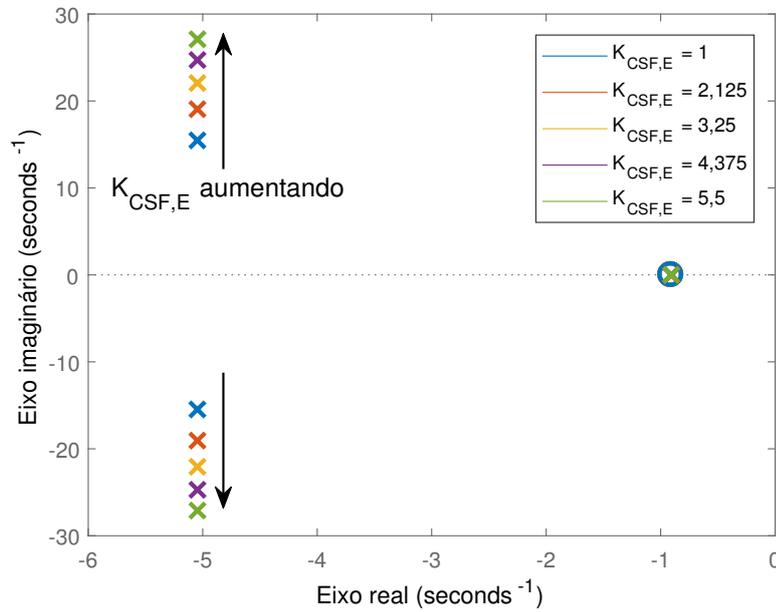
A Figura 4.18 mostra o lugar das raízes para a saída Q_{MG} . Os zeros foram exibidos para a entrada Q_{ref} e todos os pólos estão do lado esquerdo do semiplano real.

Analisando as Figuras 4.15–4.18 é possível ver que o sistema se mantém estável mesmo com a variação dos ganhos atribuídos pela lógica multitarefa fuzzy. Entretanto, estas análises foram conduzidas apenas para a variação de um dos ganhos de cada vez. A análise $\mu(M)$ faz a combinação das variações nos parâmetros para verificar a estabilidade robusta do sistema.

4.4.2 Robustez do CSF

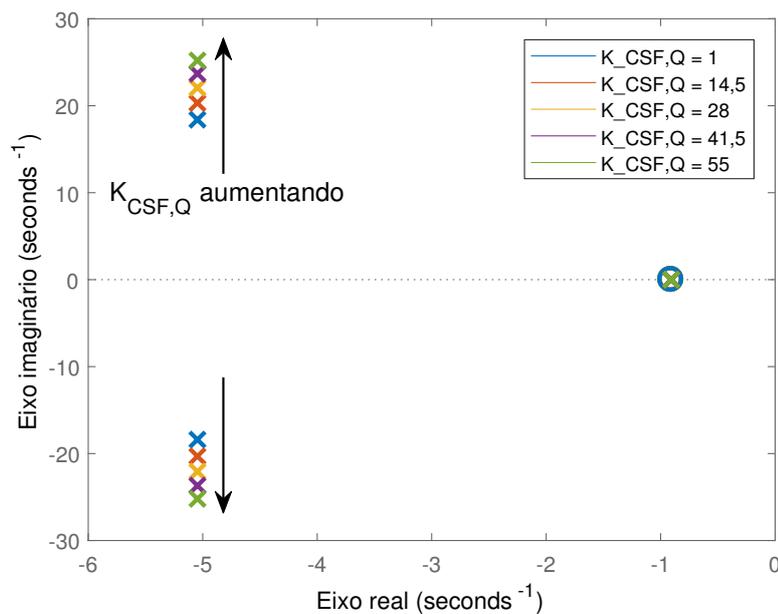
De acordo com o discutido na Seção 3.5, a análise $\mu(M)$ foi realizada a partir do modelo da Fig. 3.26, quando colocado na forma padrão $M - \Delta_{CSF}$ (Fig. 3.27). Os limitantes superior e inferior de $\mu(M)$ pela frequência são apresentados na Fig. 4.19. Sendo os valores de $\mu(M) < 1$, a condição de estabilidade robusta é satisfeita e o sistema é dito estável (SKOGESTAD; POSTLETHWAITE, 2007).

Figura 4.17: Lugar das raízes para a malha de controle de tensão para $K_{CSF,Q} = K_{CSF,Q,nom}$ e diferentes valores de $K_{CSF,E}$.

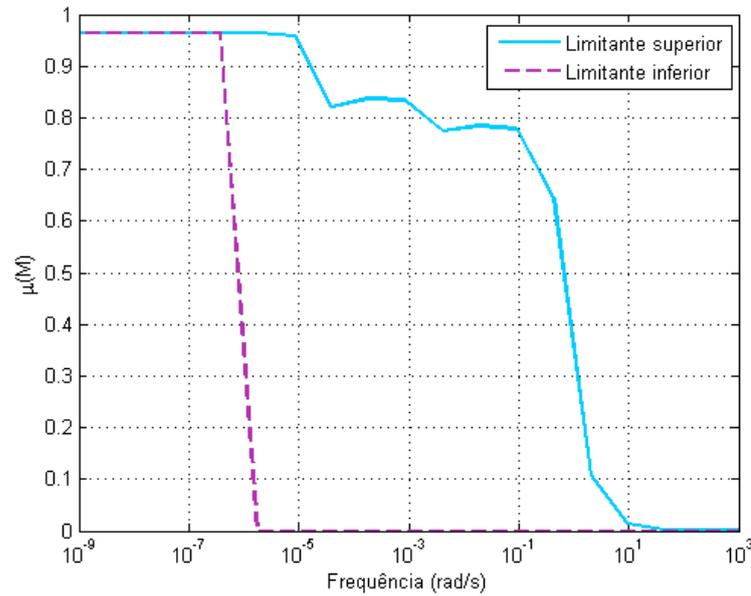


Fonte: Acervo pessoal.

Figura 4.18: Lugar das raízes para a malha de controle de potência reativa para diferentes valores de $K_{CSF,Q}$ e $K_{CSF,E} = K_{CSF,E,nom}$.



Fonte: Acervo pessoal.

Figura 4.19: Análise $\mu(M)$ para a malha de controle com incertezas nos ganhos do CSF.

Fonte: Acervo pessoal.

4.5 Resultados de simulação para os inversores

A fim de verificar o comportamento do controlador secundário proposto quando operando de modo isolado ou conectado à rede de distribuição e durante a ocorrência de um ilhamento não-intencional, simulações no Matlab/Simulink foram realizadas para a microrrede baseada em inversores descrita na Seção 4.1. Os controladores hierárquicos convencionais também foram simulados. Os cenários representados por CSF é composto pelo controlador primário, das GDs, e o controlador secundário multitarefa proposto. Utilizando os modelos disponíveis no Simulink, a microrrede foi simulada considerando duas DGs com barramentos CC independentes e discretizando todos os controladores. Os cenários representados por CHC, pelo primário, das GDs, os secundários de frequência e tensão e os terciários de potência ativa e reativa.

Os ganhos e as constantes de tempo dos filtros de entrada e saída do CSF são listadas na Tabela 4.4. Os ganhos $K_{i,\omega}$, $K_{p,\omega}$, $K_{i,E}$ e $K_{p,E}$ foram sintonizados para obter uma resposta no tempo semelhante à resposta quando a microrrede opera com o CHC.

Tabela 4.4: Ganhos e constantes de tempo do CSF

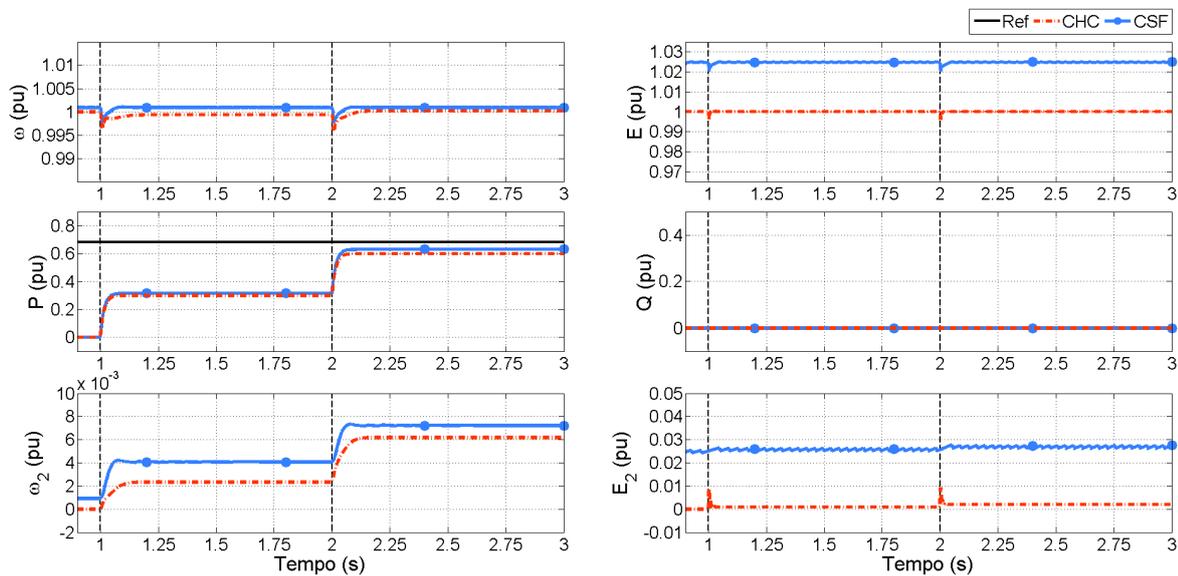
Parâmetros de entrada	Valor	Parâmetros de saída	Valor
$K_{e\omega}$	500	$K_{p,\omega}$	0,004
$K_{d\omega}$ e K_{dE}	0,1	$K_{i,\omega}$	0,1
K_{eP} e K_{eQ}	1	$K_{p,E}$	0,05
K_{eE}	20	$K_{i,E}$	0,5
T_{InLPF}	1	T_{OutLPF}	1

4.5.1 Microrrede operando em modo isolado com cargas locais

A simulação para o modo de operação isolado foi realizada com conexões e desconexões de cargas no PCC. A microrrede regula a frequência e a tensão neste barramento nos valores nominais de operação. No instante 1 s e 2 s, as cargas locais foram conectadas, cada uma consumindo $P_{\text{carga}} = 0,3$ pu.

Os resultados da simulação para o CHC e o CSF são apresentados na Fig. 4.20. É

Figura 4.20: Frequência e tensão durante a conexão de cargas no PCC.



Fonte: Acervo pessoal.

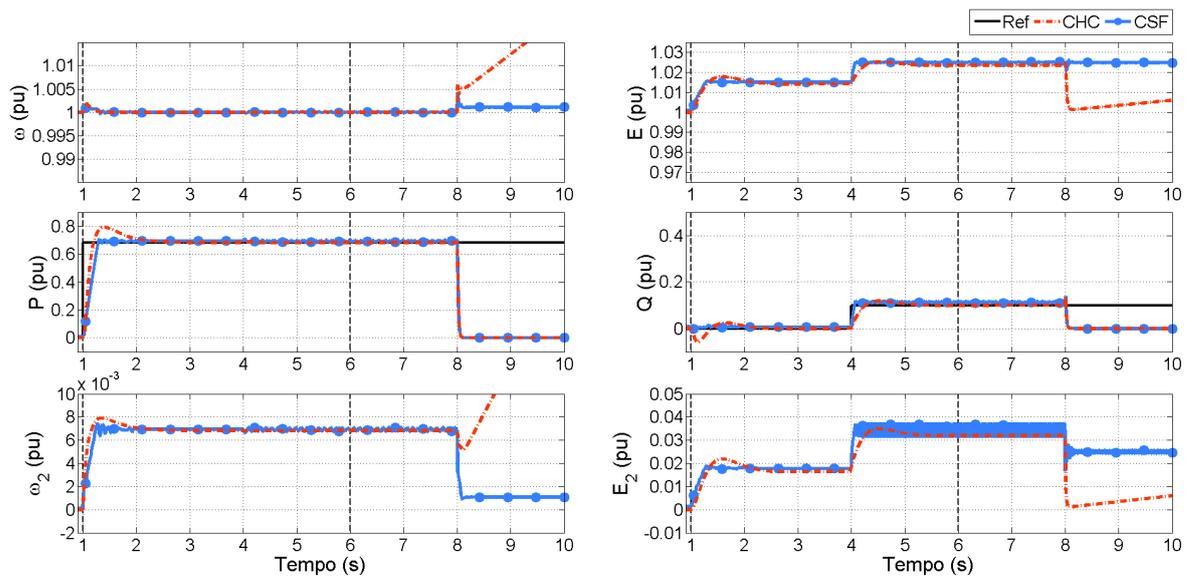
possível notar que o CSF funciona como o nível secundário do CHC, corrigindo o desvio causado pelo droop e trazendo a microrrede para um ponto de operação próximo à tensão e frequência nominal (1 pu). A tensão no PCC foi totalmente corrigida utilizando o CHC, mas não com o CSF. Entretanto, a tensão com o CSF está dentro do intervalo predeterminado ($\pm 2,5\%$) no momento de configurar seus ganhos de entrada. Isto acontece porque o CSF regula também a potência reativa, através da mesma variável manipulada (E_2). Assim, o CSF tenta regular a potência reativa ($Q_{\text{ref}} = 0$) até que a tensão atinja o nível de desvio máximo predeterminado. As potências fornecidas pela microrrede são as demandadas pelas cargas conectadas ao PCC. Os valores de ω_2 e E_2 são apresentados na Fig. 4.20 e eles variam de acordo com a mudança dos pontos de operação da microrrede, dado pelas cargas locais.

4.5.2 Ocorrência de um ilhamento não-intencional durante a operação conectada à rede de distribuição

A microrrede já está conectada à rede de distribuição e o CHC está operando com o nível terciário (controle de potência ativa e reativa). Em 1 s, a referência de potência ativa, P_{ref} , muda de 0 pu para 0,7 pu e Q_{ref} continua em 0 pu. Em 4 s, Q_{ref} é alterado para 0,1 pu. Então, em 8 s, ocorre um ilhamento não-intencional, isolando a microrrede da rede. A resposta da microrrede operando com o CHC e o CSF é apresentada na Fig. 4.21.

Nenhuma das estratégias de controle estão operando com um sistema de detecção de ilhamento (SDI). É possível notar que ambas as estratégias estão controlando as potências ativas e reativas injetadas enquanto a microrrede está conectada no PCC (até 8 s, quando o ilhamento acontece).

Figura 4.21: Ilhamento não intencional durante a operação da microrrede conectada à rede de distribuição. Nenhuma das estratégias estão utilizando um sistema de detecção de ilhamento.



Fonte: Acervo pessoal.

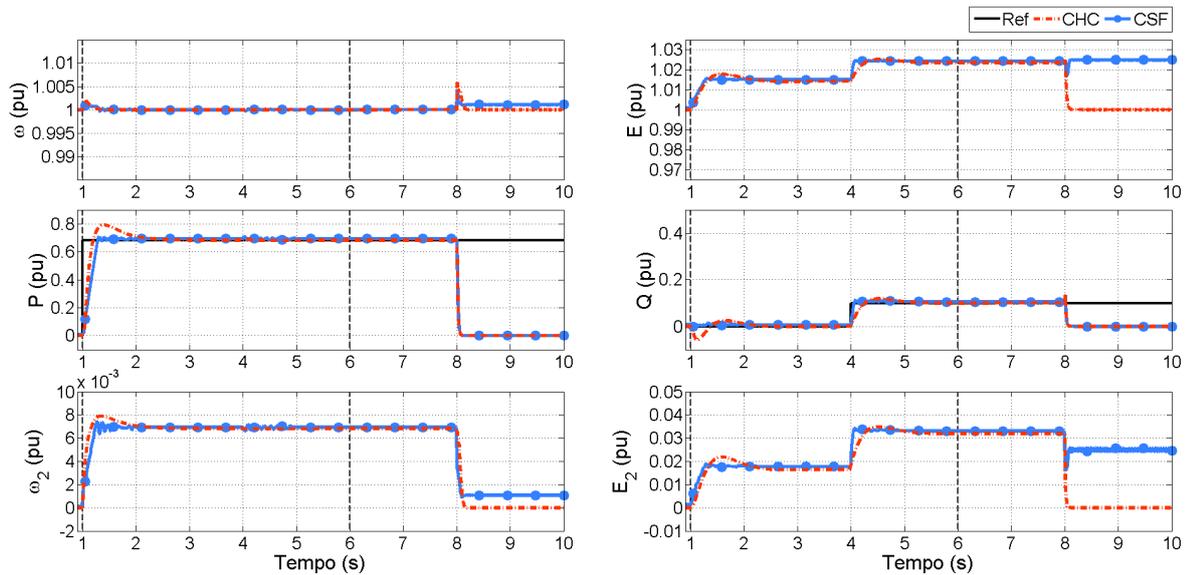
Como não há um SDI, o nível terciário do CHC tenta manter a injeção de potência no barramento com a mesma referência de antes do ilhamento. Assim, a frequência e a tensão do PCC da microrrede ilhada serão alterados até atingir algum nível de saturação dos controladores ou até ativar alguma proteção, como relé de subtensão/sobretensão ou sub-frequência/sobre-frequência.

Enquanto isso, o CSF detecta que a tensão e a frequência estão saindo do nível de desvio máximo predeterminado e é necessário mudar a prioridade da variável controlada. Com isso, a injeção de potência na microrrede ilhada deixa de ser a prioridade e o controle de tensão e frequência do barramento passa a ser mais importante, sem utilizar um SDI.

Outra simulação foi feita utilizando um SDI juntamente com o CHC, como mostra a Fig. 4.22. O SDI atua 40 ms depois da ocorrência do ilhamento (cerca de 2 ciclos de tensão, à 50 Hz). A detecção do ilhamento, além de desconectar a microrrede do PCC, desliga a camada terciária do CHC, abre a chave CB_{rede} e permite que o CHC regule a frequência e a tensão local.

O CSF não precisa de um SDI porque não há chaveamento de camadas de controle como no CHC. Ambas as simulações tiveram comportamentos similares, mas o CSF opera dentro do desvio máximo predeterminado. Depois de desligar a camada terciária, o CHC passa a operar no nível secundário, regulando a tensão e a frequência para nos níveis nominais (1 pu).

Figura 4.22: Operação da microrrede utilizando o CHC com SDI e o CSF, após a ocorrência de um ilhamento não-intencional.



Fonte: Acervo pessoal.

A operação da microrrede ilhada pode ocorrer somente quando a potência demandada pelas cargas da ilha podem ser supridas, ou seja, as GDs da microrrede podem fornecer a potência que as cargas demandam. Caso contrário, alguma proteção da microrrede pode ser acionada, desligando as GDs e cessando o fornecimento de energia.

4.6 Resultados de simulação de uma microrrede com GMG

A sintonia dos ganhos de saída $K_{i,\omega}$ e $K_{i,E}$ foi realizada através de análises do comportamento da microrrede para eventos como entrada e saída de cargas, conexão com

a rede e ocorrência de ilhamento não intencional. Os ganhos e as constantes de tempo encontrados estão na Tabela 4.5.

Tabela 4.5: Ganhos e constantes de tempo do CSF

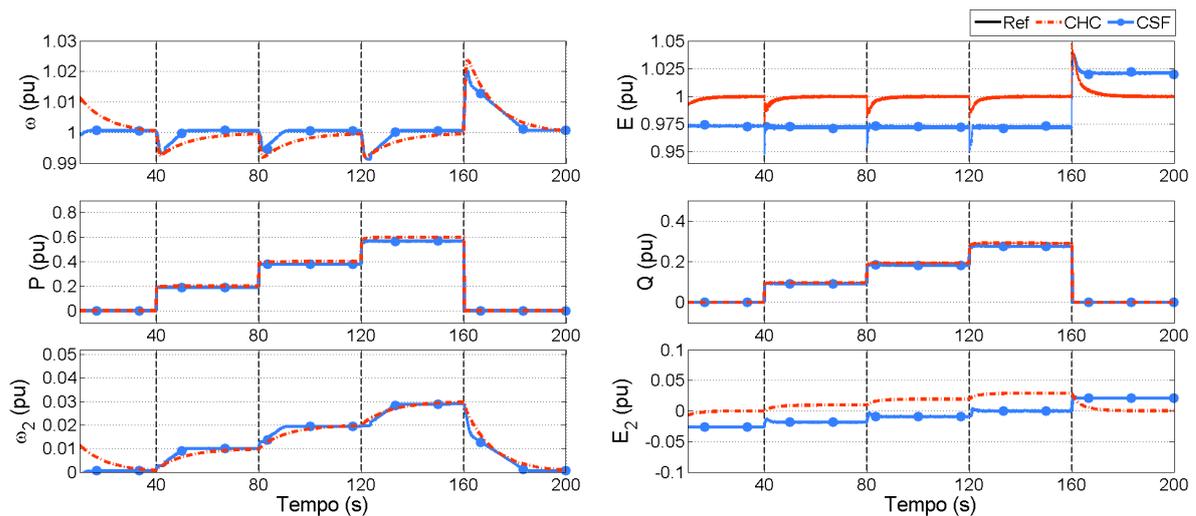
Parâmetros de entrada	Valor	Parâmetros de saída	Valor
$K_{e\omega}$	300	$K_{p,\omega}$	0
$K_{d\omega}$ e K_{dE}	10	$K_{i,\omega}$	0,0133
K_{eP} e K_{eQ}	1	$K_{p,E}$	0
K_{eE}	10	$K_{i,E}$	0,1
T_{InLPF}	1	T_{OutLPF}	1

4.6.1 Microrrede operando isolado com cargas locais

Os ensaios com a microrrede isolada foram realizados com entradas e saída de cargas. A GD opera controlando a tensão e a frequência no PCC nos valores nominais de operação. Aos 40 s, 80 s e 120 s ocorre as entradas das cargas locais. As cargas locais foram configuradas como cargas RL e $S_{carga} = 0,2 + j0,097$ pu. Aos 160 s, acontece a desconexão das cargas RL.

Foram realizadas simulações com o CHC e o CSF e os resultados para operação isolada são apresentados na Fig. 4.23. É possível notar que o CSF funciona como o controlador

Figura 4.23: Frequência e tensão terminal para entradas sucessivas de cargas RL de 0,2 pu e fator de potência 0,9 atrasado.



Fonte: Acervo pessoal.

secundário do CHC, corrigindo a ação do *droop* e trazendo o sistema para operar nos próximos aos valores nominais de tensão e frequência. A tensão no barramento foi corrigida totalmente com o CHC, mas não voltou para 1 pu com o CSF. Entretanto, a tensão está

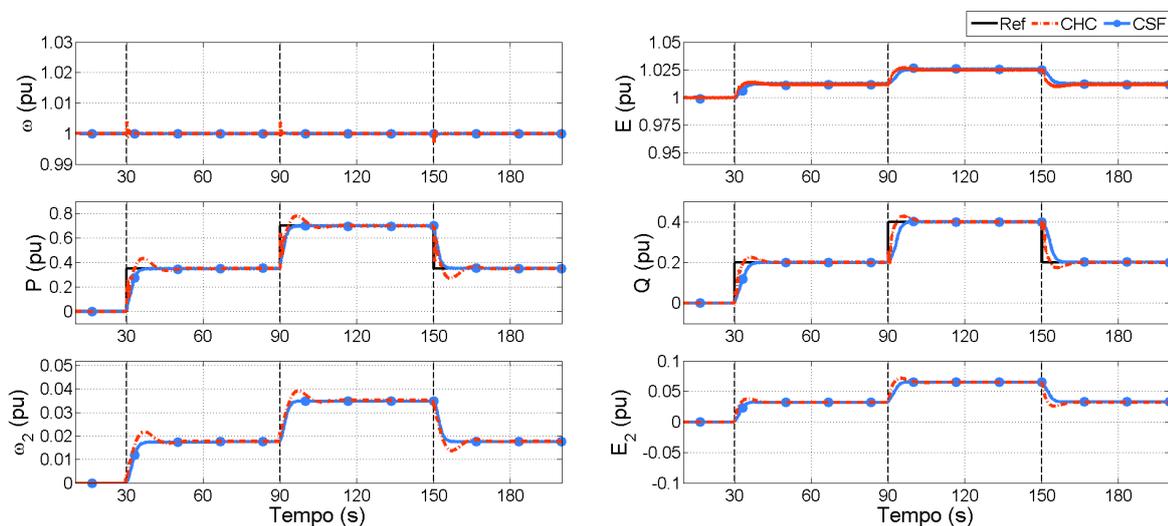
operando dentro da margem de erro calculada para os ganhos de entrada. Os valores de potência ativa e reativa são os demandados pelas cargas locais. Ainda, são apresentados na Fig. 4.23 os valores de ω_2 e E_2 , que variam de acordo com o ponto de operação da microrrede.

4.6.2 Microrrede conectada na rede de distribuição e exportando potência ativa e reativa

Os ensaios com a microrrede conectada foram realizados a partir conexão da GD à rede de distribuição. Depois de conectado, a GD exporta potência ativa e reativa para a rede. Os valores das potências ativa e reativa exportados aumentam e diminuem durante a simulação.

A Figura 4.24 mostra o comportamento da GD para o CHC e o CSF. A conexão da GD com a rede ocorre aos 30 s. No momento da conexão, as referências de potências ativa e reativa são 0,4 pu e 0,2 pu, respectivamente. Aos 90 s, a referência de potência ativa muda para 0,8 pu e a referência de potência reativa para 0,4 pu. Finalmente, aos 150 s, as referências voltam para os valores originais 0,4 pu e 0,2 pu.

Figura 4.24: operação do CHC e do CSF conectado à rede de distribuição, com alteração da referência de potência ativa e reativa.



Fonte: Acervo pessoal.

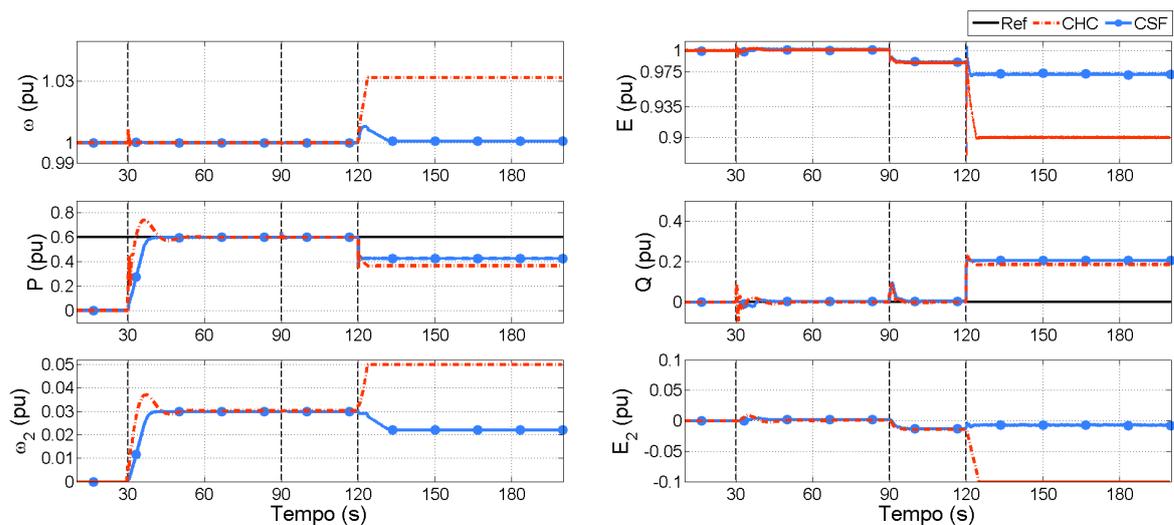
A frequência do sistema é ditada pela rede de distribuição, por isso não há alterações nos momentos de transitórios de potência ativa. Já a tensão é controlada localmente no barramento da microrrede, sendo alterada à medida que a referência de potência reativa sofre mudanças. O CHC opera através do controlador terciário para controlar as potências ativa e reativa fornecida à rede de distribuição. A operação do CSF se mantém como no

caso anterior, sem chaveamentos de controladores. Ambos os controladores conseguem fornecer as potências ativas e reativas requisitada pelas respectivas referências.

4.6.3 Microrrede operando conectada na rede de distribuição e ocorrência de um ilhamento não intencional

Os ensaios que simulam um ilhamento não intencional são apresentados a seguir. As simulações foram iniciadas a partir da conexão entre a GD e a rede de distribuição aos 30 s, junto com o chaveamento do controlador terciário do CHC. No momento da conexão entre os sistemas, P_{ref} é 0,6 pu e Q_{ref} é 0 pu. Após a conexão com a rede, houve uma entrada de carga com potência nominal de 0,5 pu e fator de potência 0,9 atrasado em 90 s. Aos 120 s ocorreu o ilhamento não intencional, que isolou a GD e a carga local da rede de distribuição, resultando em uma microrrede isolada.

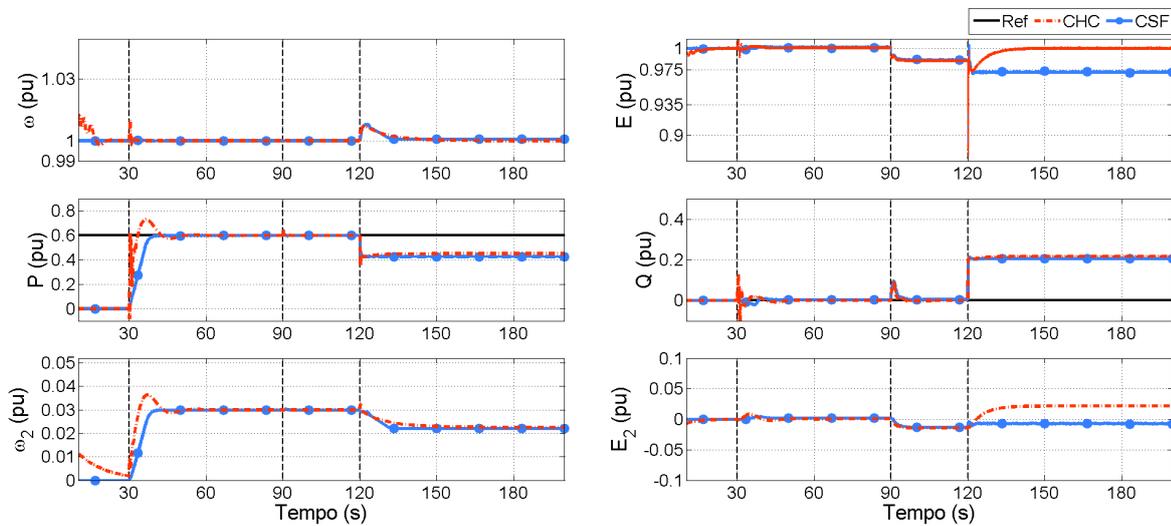
Figura 4.25: operação da microrrede com o CHC e o CSF durante a ocorrência de um ilhamento não intencional.



Fonte: Acervo pessoal.

A Figura 4.25 mostra o resultado de simulações com o CSF e com o CHC, sem um sistema de detecção de ilhamento. Como não há um sistema de detecção de ilhamento na estrutura de controle, o CHC continua tentando controlar as potências ativa e reativa através do controlador terciário. Enquanto isso, o CSF percebe os erros de frequência e tensão aumentando e atua na microrrede como se operasse de maneira isolada, sem presença de estruturas chaveadas de controle. Os sinais de controle ω_2 e E_2 do CHC saturam por causa do controlador terciário, por não controlar a frequência e a tensão do barramento da microrrede. Com a tensão em 0,9 pu para o CHC, houve uma alteração no P e no Q demandados pela carga local. A diferença da potência ativa e reativa entre o CHC e o CSF se deve aos valores de frequência e tensão no barramento.

Figura 4.26: operação da microrrede com o CHC (com detecção de ilhamento em 200 ms) e o CSF durante a ocorrência de um ilhamento não intencional.



Fonte: Acervo pessoal.

A Figura 4.26 mostra o mesmo caso da Fig. 4.25. Entretanto, o CHC possui um sistema de detecção de ilhamento atuando em 200 ms após o ilhamento.

A detecção do ilhamento, além de tirar a MR do barramento, faz o chaveamento do controlador terciário para secundário, abrindo a chave C_1 , vide Figs. 2.4 e 2.9. O CSF não necessita do chaveamento dos modos de controle como no CHC. Ambas as estratégias obtiveram respostas próximas, mas o CSF opera dentro da faixa de erro determinada anteriormente. Após a realização do chaveamento, o CHC corrige a tensão e a frequência para os valores nominais (1 pu).

A operação em modo isolada com o CSF só é permitida porque a potência demandada pela nova porção da rede é menor que a potência nominal da GD. Caso a potência demandada seja maior, uma proteção de sobrecorrente atuaria e isolaria a microrrede do barramento.

Resultados experimentais

Os inversores de potência são equipamentos versáteis e uma das suas principais aplicações, atualmente, é o condicionamento de energia provinda de fontes renováveis. Sendo assim, foram escolhidos para serem utilizados na validação do controlador proposto.

Os controladores das GDs bem como as estruturas de controle hierárquico foram implementados na plataforma dSPACE. Resultados experimentais para a microrrede com inversores refletindo operações corriqueiras utilizando ambos o CHC e o CSF foram obtidas. Cenários como a operação no modo isolado da rede, fazendo controle da tensão/frequência do barramento, ou no modo conectado à rede, controlando a injeção de potência ativa e reativa no PCC, são ilustrados. Além disso, as respostas da microrrede diante de um evento de ilhamento não-intencional são apresentadas para mostrar a flexibilidade do CSF frente ao CHC.

5.1 Descrição do bancada

Uma bancada experimental disponibilizada pelo *Harmonic Group* da *Aalborg University* foi utilizada para validar o funcionamento do CSF. A bancada é composta por um módulo de controle da dSPACE, fontes CC da Yaskawa para controle da tensão no barramento CC (simulando fontes alternativas de energia), inversores de potência da Danfoss, filtros LC, indutores de acoplamento, ponto de conexão comum, uma carga resistiva e transformador isolador para conexão com a rede. Fotos da bancada são apresentadas nas Figs. 5.1 e 5.2.

5.1.1 Filtro LC e indutor de acoplamento

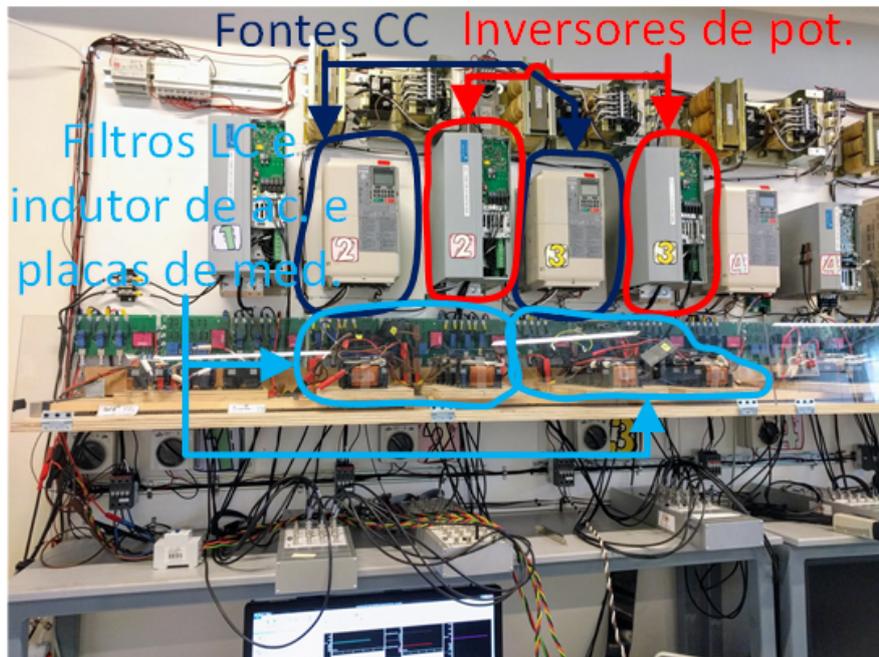
O filtro LC de cada GD é composto por um conjunto de indutores, um indutor por fase, e três capacitores ligados em delta. Os valores dos componentes dos filtros LC das GDs, da rede e da carga resistiva são apresentados na Tabela 5.1. A Figura 5.3 mostra como os filtros foram montados. Ainda, ao fundo da figura, é possível ver as placas

Tabela 5.1: Parâmetros do sistema da plataforma experimental

Parâmetros		Valores	
GDs			
Indutor do filtro LC	L_{fc}	1.5	mH
Capacitor do filtro LC	C_f	25	μF
Indutor de acoplamento	L_{fr}	1.5	mH
Tensão do barramento CC	V_{cc}	730	V
Frequência de chaveamento dos inversores	f_s	10	kHz
Rede			
Indutor da rede	L_{rede}	4	mH
Resistência do indutor da rede	R_{rede}	1	Ω
Tensão da rede (RMS)	V_r	200	V
Frequência da rede	f_r	50	Hz
Carga			
Resistência da carga	R_{carga}	80	Ω

Fonte: Acervo pessoal.

Figura 5.1: Bancada utilizada para testes com a microrrede: dois inversores de potência com cada fonte CC, os filtros LC, o indutor de acoplamento e as placas de medição e condicionamento dos sinais.



Fonte: Acervo pessoal.

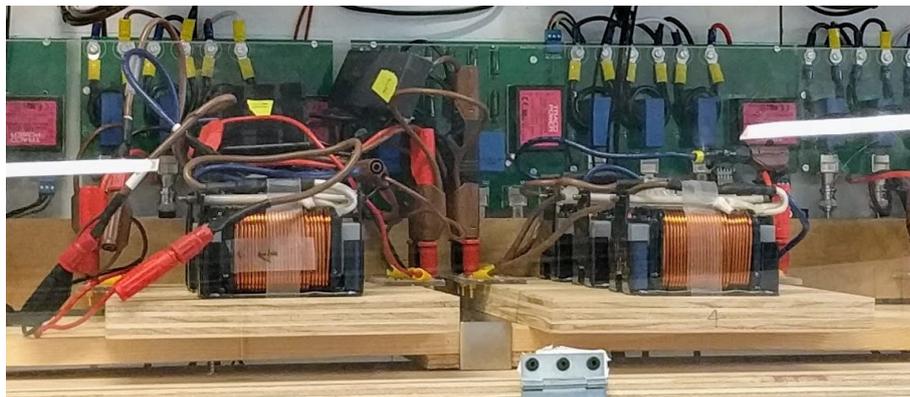
de medição e condicionamento (duas de corrente, nas extremidades, e uma de tensão, ao centro) utilizadas para medir e disponibilizar os sinais para a placa de aquisição do dSPACE.

Figura 5.2: Bancada utilizada para testes com a microrrede: carga conectada ao PCC e o ponto de conexão com a rede.



Fonte: Acervo pessoal.

Figura 5.3: Filtro LC e indutor de acoplamento e placas de condicionamento de sinal utilizados na bancada.



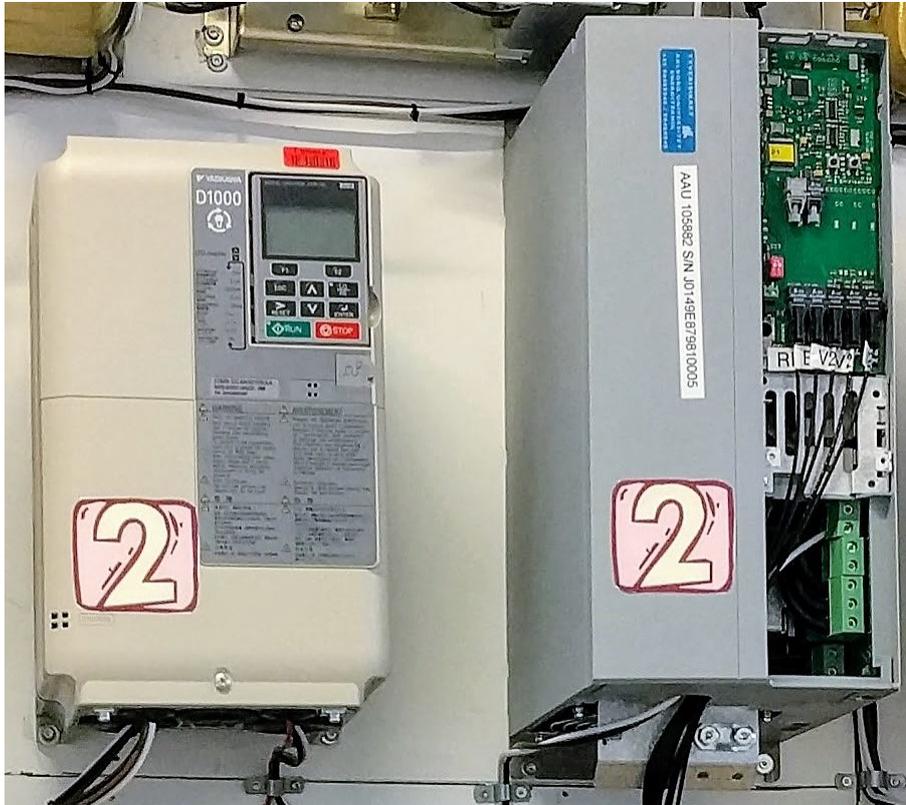
Fonte: Acervo pessoal.

5.1.2 Barramento CC e inversor de potência

A tensão no barramento CC é controlada por uma fonte regenerativa D1000 produzida pela Yaskawa. A fonte controla a tensão CC em 730 V, com potência nominal de 10 kW. O inversor de potência utilizado foi o FC 302 da Danfoss. A controladora original do inversor foi substituída por uma controladora com entradas óticas providas do dSPACE. A potência nominal do inversor é de 15 kVA. A Figura 5.4 mostra o detalhe dos

equipamentos utilizados na bancada.

Figura 5.4: Fonte regenerativa da Yaskawa (à esquerda) e inversor de potência da Danfoss (à direita) utilizados na bancada.



Fonte: Acervo pessoal.

5.1.3 Configuração da plataforma dSPACE

A plataforma dSPACE foi utilizada para aquisição das medições, implementação das malhas de controle e sintetização do sinal PWM de atuação nos IGBTs do inversor de potência. A vantagem de utilizar essa plataforma está na facilidade de implementar os controladores sintonizados na simulação, substituindo os blocos dos modelos do sistema elétrico por blocos correspondentes aos de entrada e saída da biblioteca da dSPACE.

É composta por um kit educacional de controle avançado DS1007, montado em uma caixa de expansão PX10, duas placas de aquisição DS2004 com 16 canais A/D de 16 bits, e uma placa de saída digital DS5101 para o PWM das GDs. Uma placa desenvolvida por pesquisadores da AAU faz a conexão entre a placa DS5101 e o inversor FC 302 através de fibra ótica. As placas da AAU são mostradas na Fig. 5.5. O esquema de ligações das placas e os locais de medição e atuação são mostrados na Fig. 5.6.

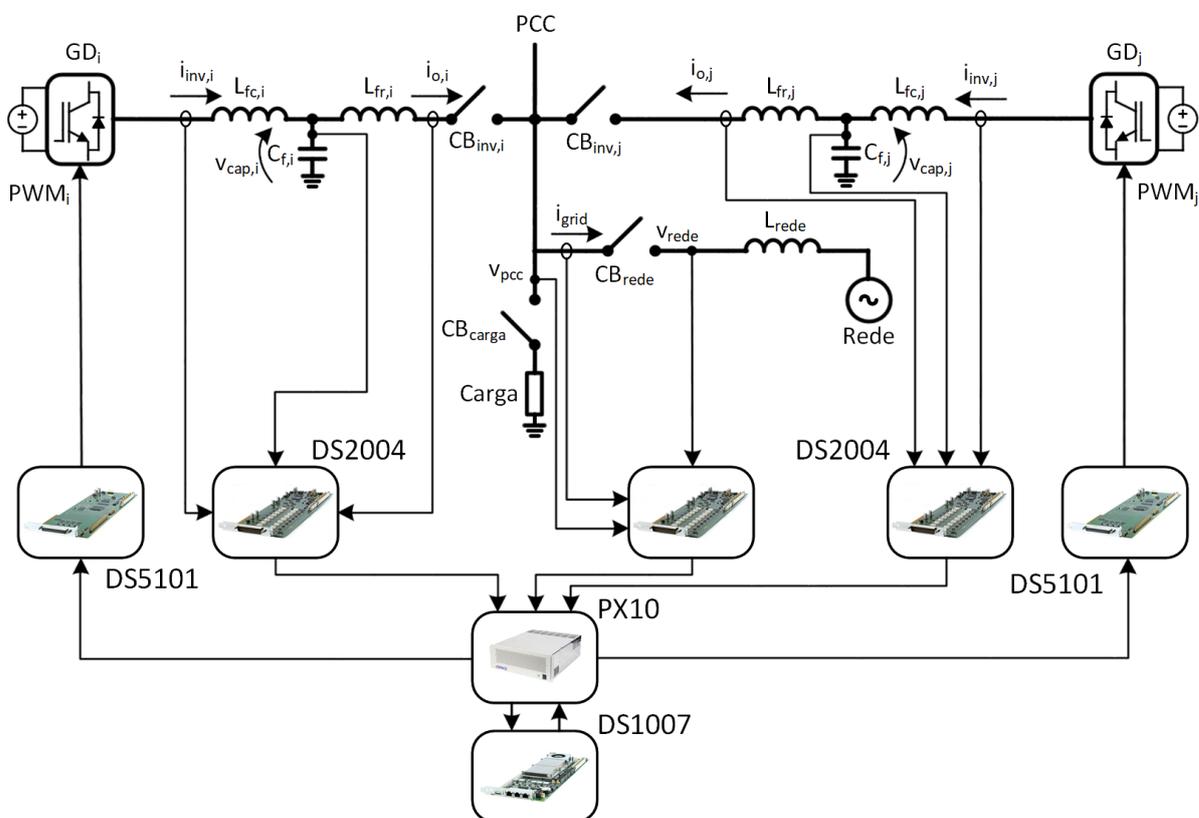
A amostragem dos sinais adquiridos pela DS2004 foi realizada à uma taxa de 10 kHz, justamente com o chaveamento dos IGBTs dos inversores. Devido a vantagem da rápida prototipagem oferecida pelo software da dSPACE, a implementação das malhas de controle

Figura 5.5: Placas de de conexão entre o dSPACE e o inversor FC 302.



Fonte: Acervo pessoal.

Figura 5.6: Diagrama de ligações do sistema com o módulo da dSPACE e suas placas.



Fonte: Acervo pessoal.

foi feita depois da substituição dos modelos do sistema elétrico pelos respectivos blocos de entrada e saída correspondentes das placas da dSPACE. Os mesmos testes apresentados para a simulação no Capítulo 4 foram realizados na bancada. Os resultados obtidos são apresentados a seguir.

5.2 Resultados da operação isolada e conectada

A validação das simulações, apresentadas na Seção 4.5, foi realizada na bancada da AAU, com o controlador hierárquico convencional e controlador secundário fuzzy.

5.2.1 Operação isolada

Primeiro, uma conexão de carga é feita e os controladores secundários devem corrigir os desvios de tensão e frequência causados pelo droop. Então, a carga é desconectada e os desvios devem ser corrigidos novamente. O funcionamento e desempenho do CHC e do CSF podem ser vistos nas Figs. 5.7, 5.8, e 5.9.

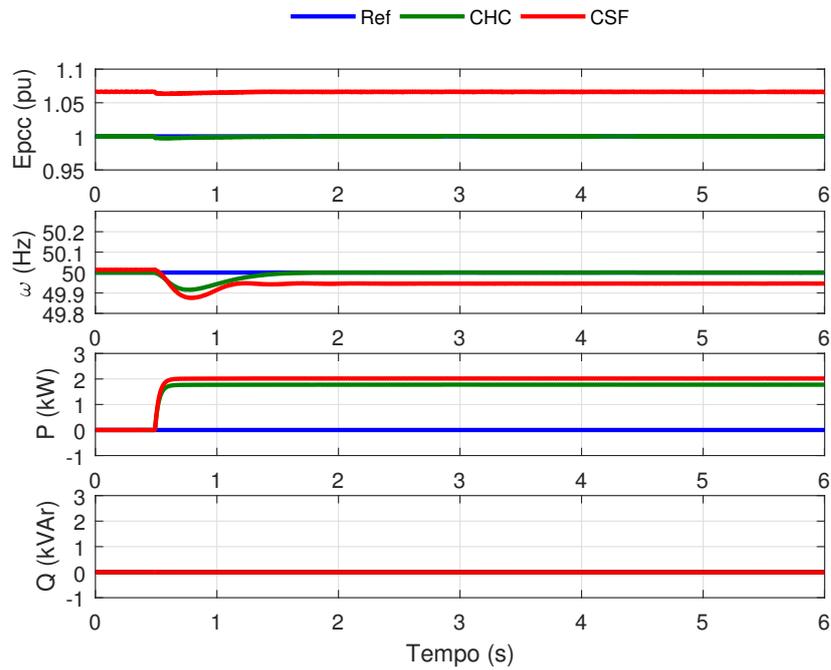
Após a conexão da carga, Fig. 5.7, o CHC corrigiu os desvios de tensão e frequência. O CSF não corrigiu totalmente o desvio, uma vez que sua operação é baseada em um intervalo pré-definido pelo operador do sistema no momento da sintonia dos ganhos de entrada do fuzzy. Uma vez que o P_{ref} é definido como 0 kW (operação isolada), o e_P é negativo e o CSF tenta reduzir a injeção de potência ativa para a carga, forçando o desvio do ω_{pccFSC} até atingir o limite de frequência pré-definido pelas funções de pertinência e o ganho K_{e_w} . A diferença de potência ativa entre os diferentes cenários acontece por causa do desvio de tensão do CSF.

Quando a carga é desconectada, Fig. 5.8, a potência ativa vai a 0 kW, assim como o e_P . Então, o CSF corrige o desvio de frequência causado pela mudança no ponto operação da curva do droop e a desconexão da carga. O CHC corrige os desvios normalmente.

A Figura 5.9 apresenta a resposta na microrrede isolada utilizando o CHC e o CSF dada a conexão e desconexão de uma carga indutiva. A carga indutiva é um motor de indução trifásico, ligado a vazio em 2 s e desligado em 5,5 s. Assim como para a carga resistiva, neste cenário, o CHC corrigiu os valores de frequência e tensão, enquanto o CSF manteve dentro dos limites de operação.

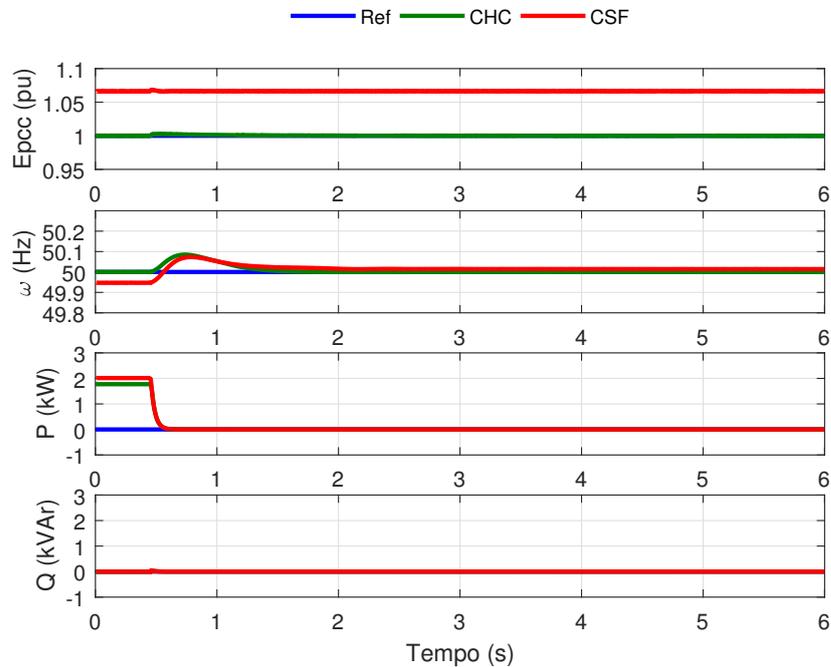
Os cenários para operação isolada mostraram que o CHC opera como esperado, corrigindo os desvios de tensão e frequência, e o CSF opera dentro do intervalo pré-determinado de operação. A operação conectada à rede e o comportamento do controlador terciário é mostrado a seguir.

Figura 5.7: Operação dos controladores secundário para conexão da carga resistiva.



Fonte: Acervo pessoal.

Figura 5.8: Operação dos controladores secundário para desconexão da carga resistiva.

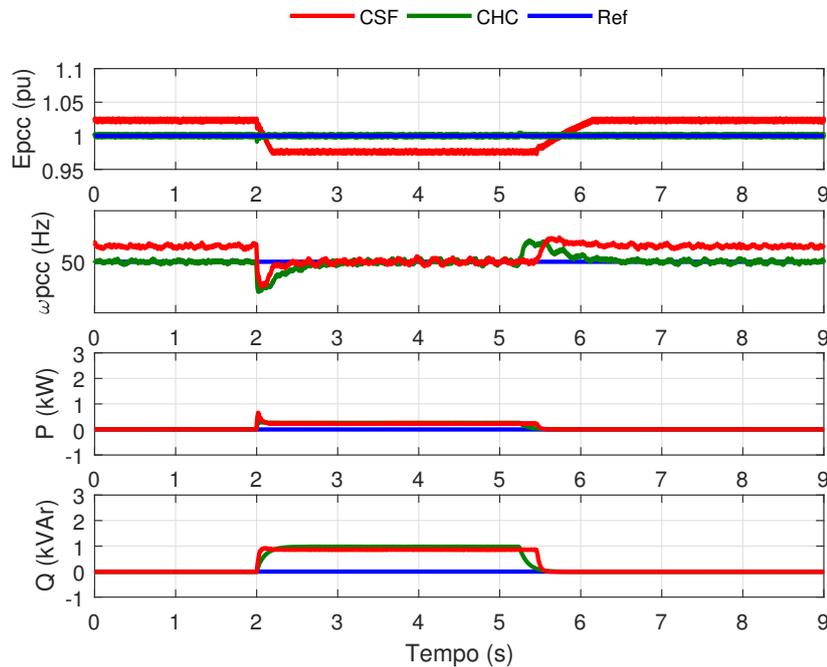


Fonte: Acervo pessoal.

5.2.2 Operação conectada

O funcionamento dos controladores terciários são ilustrados através de um degrau positivo de potência ativa, apresentado na Fig. 5.10, e um degrau negativo, exibido na

Figura 5.9: Operação dos controladores secundário para conexão de uma carga indutiva (motor).



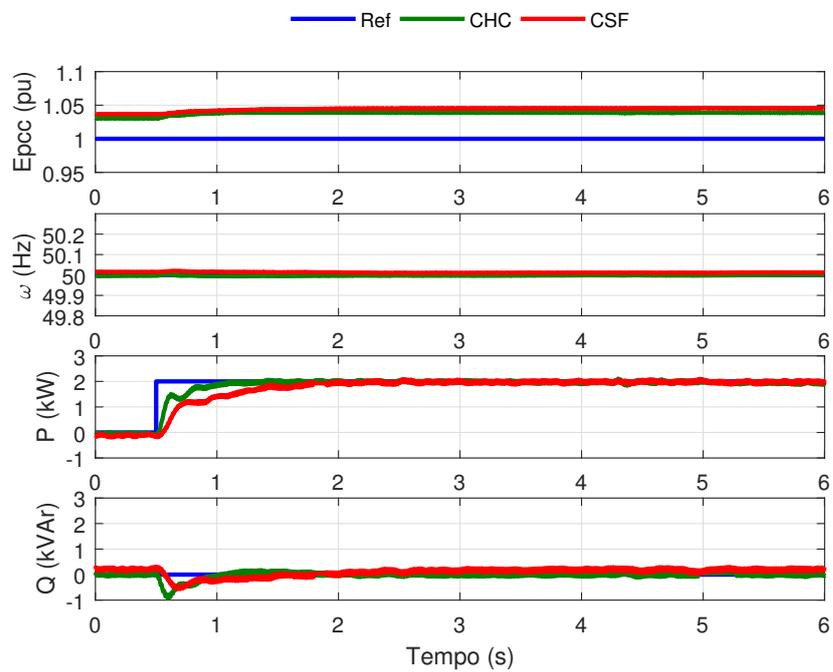
Fonte: Acervo pessoal.

Fig. 5.11. Somente o CHC possui uma malha de controle no nível terciário, isto é, o chaveamento de um controlador terciário. O CSF proposto opera sem o chaveamento de controlador.

Depois de um degrau de 2 kW, ambos os controladores supriram a potência ativa requisitada. A troca de potência reativa entre a microrrede e a rede de distribuição é 0 kVAr ($Q_{ref} = 0$ kVAr). O E_{pcc} teve que ser aumentado para que a troca de potência reativa fosse mantida em 0 kVAr. A frequência da microrrede (ω_{pcc}) muda temporariamente para injetar a potência ativa, e, depois, volta para o valor nominal de operação em ambos os cenários.

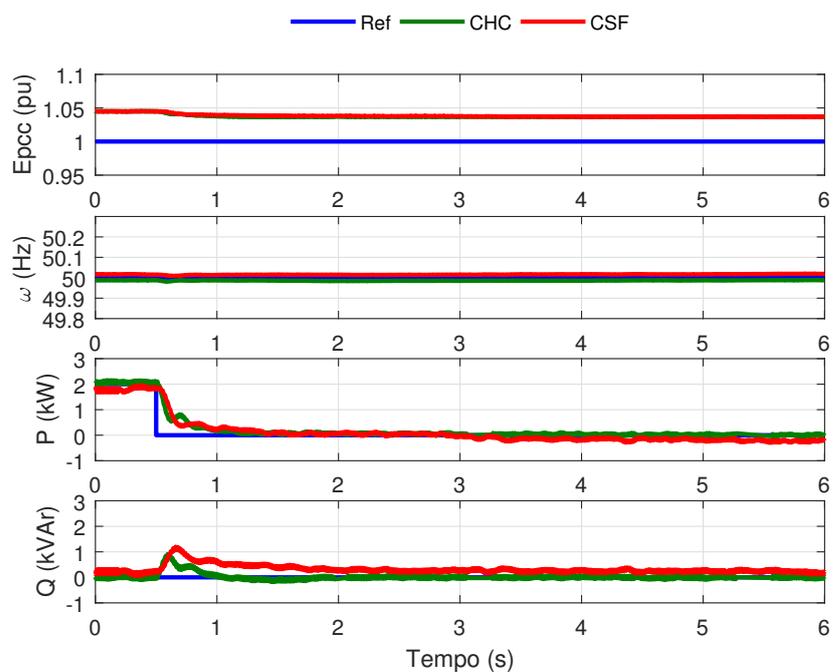
O degrau negativo de 2 kW é apresentado na Fig. 5.11. Do mesmo modo, tanto o CHC quanto o CSF foram capazes de regular a potência ativa e reativa requisitada. Como é possível notar, o CHC e o CSF puderam regular a troca de potência entre a microrrede e a rede de distribuição. Entretanto, não existe o nível terciário no CSF, sendo desnecessário o chaveamento entre controladores de frequência/potência ativa e tensão/potência reativa. O próximo cenário mostra a real vantagem da utilização do CSF em comparação ao CHC.

Figura 5.10: Desempenho do controlador terciário para um degrau positivo de potência ativa.



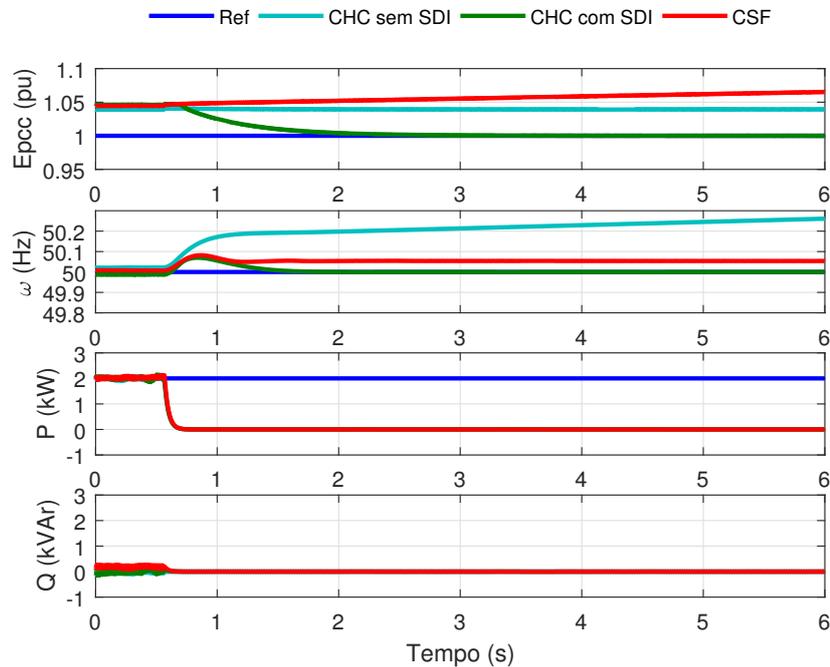
Fonte: Acervo pessoal.

Figura 5.11: Desempenho do controlador terciário para um degrau negativo de potência ativa.



Fonte: Acervo pessoal.

Figura 5.12: Operação do CHC com e sem um sistema de detecção de ilhamento (SDI) e do CSF durante a ocorrência de um ilhamento não intencional.



Fonte: Acervo pessoal.

5.3 Resultados da ocorrência de um ilhamento não-intencional

Um ilhamento não-intencional é provocado para ilustrar a necessidade da utilização do CHC com sistema de detecção de ilhamento (SDI) e chaveamento dos controladores do terciário para o secundário. O comportamento com e sem um sistema de detecção de ilhamento para o CHC e o CSF são testados e suas respostas são apresentadas na Fig. 5.12. O ilhamento foi provocado com a abertura da chave que liga a rede de distribuição ao PCC, cortando o fluxo de potência que ia para a rede. No instante da abertura, nenhum dos controladores recebeu a informação de que o ilhamento estava acontecendo.

Após a ocorrência do ilhamento, o CHC com SDI funcionou como esperado, chaveando do controlador terciário para o secundário, regulando a tensão e a frequência do PCC. O CHC sem SDI não regula a frequência/tensão do PCC porque está operando no nível terciário, tentando aumentar a injeção de potência no barramento. Como a referência de potência reativa é mantida em zero ($Q_{ref} = 0$ kVAr), o controlador de potência reativa não mudou o nível da tensão no PCC, pois há um equilíbrio entre a potência reativa gerada e consumida. O CSF regulou a frequência/tensão do barramento, dentro dos níveis pré-definidos, após a ocorrência do ilhamento. A tensão do PCC para o CSF aumenta até atingir o nível limitante de desvio, como aconteceu nas Figs. 5.7 e 5.8. Mesmo sem um SDI, o CSF é capaz de regular a tensão/frequência do PCC, sem mudar a malha de

controle do terciário para o secundário.

Conclusão

Este trabalho apresentou uma estrutura de controle secundário multitarefa baseada em lógica fuzzy. Esta estrutura permite que a microrrede opere no modo isolado ou conectado à rede, reduzindo a dependência sobre a comunicação entre os níveis secundário e o terciário de uma estrutura de controle hierárquico. Ainda, o CSF permite que a microrrede continue a operar depois da ocorrência de um ilhamento sem a necessidade de detectar o evento.

Resultados de simulação mostraram que o CSF permite ambos os modos de operação, regulando a frequência e a tensão no PCC da microrrede e as potências ativa e reativa. Na ocorrência de um ilhamento, o CSF passou a regular a frequência e a tensão da microrrede ilhada, sem utilizar um sistema de detecção de ilhamento para chavear os controladores, como aconteceu com o controlador hierárquico convencional.

Os resultados experimentais mostraram como o CSF se comporta em algumas situações como conexão e desconexão e cargas, injeção de potência na rede e na ocorrência de um ilhamento. Mesmo sem o sistema de detecção de ilhamento, o CSF foi capaz de controlar a microrrede em ambos os modos de operação. Embora o controle da operação ilhada seja feita com uma margem de erro preestabelecida e pode ser regulada dentro de margens aceitáveis. Os resultados experimentais também confirmaram que o CHC é dependente do sistema de detecção de ilhamento para alterar as variáveis controladas. Pode-se concluir que o CSF oferece uma estratégia de controle flexível para a conexão de microrredes distribuídas e a microrrede pode suprir a demanda do sistema ilhado sem a necessidade do chaveamento do modo de controle.

Como trabalhos futuros, outros cenários podem ser testados, como curto-circuito, para comparar o comportamento da estratégia convencional com a estratégia proposta neste trabalho. Além disso, pode-se explorar o paralelismo de GDs controladas com o CSF, um para cada GD, com o objetivo de adicionar a funcionalidade tipo *plug and play* e aumentar flexibilidade para a conexão e desconexão de novas GDs em uma mesma microrrede.

6.1 Trabalhos publicados

REIS, G. B., NEVES, R. V. A., AGUIAR, C. R., MACHADO, R. Q., OLIVEIRA, V. A. A fuzzy control strategy for a diesel generating set under stand-alone and grid-connected operations. **Journal of Control, Automation and Electrical Systems**, **2014**. Springer US, v. 25, n. 2, p. 174–183, 2014. ISSN 2195-3880.

AGNOLETTO, E. J., NEVES, R. V. A., REIS, G. B., MACHADO, R. Q., OLIVEIRA, V. A. Análise dos tempos de chaveamento dos modos de operação de um sistema de geração distribuída na ocorrência de ilhação. Em: **Anais do XX Congresso Brasileiro de Automática**, **2014**. Belo Horizonte, 2014. p. 2361–2368.

NEVES, R. V. A., AGNOLETTO, E. J., REIS, G. B., MACHADO, R. Q., OLIVEIRA, V. A. Analysis of the maximum available time to switch the operation control mode of a distributed generation during an islanding occurrence. Em: **2015 IEEE Eindhoven PowerTech**. Eindhoven, Jun. 2015.

AGNOLETTO, E. J., NEVES, R. V. A., BASTOS, R. F., MACHADO, R. Q. and OLIVEIRA, V. A. Fuzzy secondary controller applied to autonomous operated AC microgrid. Em: **European Control Conference (ECC16)**. Aalborg, Jun. 2016.

NEVES, R. V. A., MACHADO, R. Q., OLIVEIRA, V. A., BLAABJERG, F. and WANG, X. Fuzzy secondary controller for autonomous stand-alone and grid-connected AC microgrid. Em: **IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society**. Florence, Out. 2016.

PADULA, A. S., AGNOLETTO, E. J., NEVES, R. V. A., MACHADO, R. Q., OLIVEIRA, V. A. Influência da estratégia de controle de um grupo gerador diesel no tempo máximo para chaveamento dos modos de controle durante ilhação. Em: **XIII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, SBAI 2017**. Porto Alegre, 2017.

NEVES, R. V. A., MACHADO, R. Q., OLIVEIRA, V. A., WANG, X. and BLAABJERG, F. Multitask fuzzy secondary controller for AC microgrid operating in stand-alone and grid-tie mode. Em: **IEEE Transactions on Smart Grid**, **2018**. Early access.

Apêndices

Detalhamento das funções de transferência

As funções de transferência utilizadas para traçar o Lugar das Raízes nas Figs. 4.4, 4.6, 4.9, 4.10, 4.11, 4.13 e 4.14 são relacionadas abaixo.

Controladores de corrente (Fig. 4.4):

Malha aberta:

$$G_{\text{PWM}}G_{\text{Lfc}} = \frac{-666,67(s - 1,333 \times 10^4)}{(s + 1,333 \times 10^4)(s + 82,47)} \quad (\text{A.1})$$

Malha aberta com controlador:

$$G_{\text{ci}}G_{\text{PWM}}G_{\text{Lfc}} = \frac{-3333,3(s - 1,333 \times 10^4)}{(s + 1,333 \times 10^4)(s + 82,47)} \quad (\text{A.2})$$

Malha fechada:

$$\begin{aligned} G_{\text{Iinv}} &= \frac{G_{\text{ci}}G_{\text{PWM}}G_{\text{Lfc}}}{1 + G_{\text{ci}}G_{\text{PWM}}G_{\text{Lfc}}} \\ &= \frac{-3333,3(s - 1,333 \times 10^4)}{s^2 + 1,008 \times 10^4s + 4,554 \times 10^7} \end{aligned} \quad (\text{A.3})$$

Controladores de tensão (Fig. 4.6):

Malha aberta:

$$G_{\text{Iinv}}G_{\text{Cf}} = \frac{-1,3333 \times 10^8(s - 1,333 \times 10^4)}{s(s^2 + 1,008 \times 10^4s + 4,554 \times 10^7)} \quad (\text{A.4})$$

Malha aberta com controlador:

$$G_{\text{cv}}G_{\text{Iinv}}G_{\text{Cf}} = \frac{-5,333 \times 10^6(s - 1,333 \times 10^4)(s + 800)}{s^2(s^2 + 1,008 \times 10^4s + 4,554 \times 10^7)} \quad (\text{A.5})$$

Malha fechada:

$$\begin{aligned} G_{\text{Vcap}} &= \frac{G_{\text{cv}}G_{\text{Iinv}}G_{\text{Cf}}}{1 + G_{\text{cv}}G_{\text{Iinv}}G_{\text{Cf}}} \\ &= \frac{-5,333 \times 10^6(s - 1,333 \times 10^4)(s + 800)}{(s^2 + 2240s + 2,878 \times 10^6)(s^2 + 7843s + 1,977 \times 10^7)} \end{aligned} \quad (\text{A.6})$$

Controladores secundários de frequência (Fig. 4.9):

Malha aberta:

$$G_d G_{PLL} = \frac{100}{(s + 10)^2} \quad (\text{A.7})$$

Malha aberta com controlador:

$$G_{c\omega sec} G_d G_{PLL} = \frac{15(s + 9)}{s(s + 10)^2} \quad (\text{A.8})$$

Malha fechada:

$$\begin{aligned} G_{\omega sec} &= \frac{G_{c\omega sec} G_d G_{PLL}}{1 + G_{c\omega sec} G_d G_{PLL}} \\ &= \frac{1,5(s + 10)(s + 9)}{(s + 1,568)(s^2 + 18,43s + 86,1)} \end{aligned} \quad (\text{A.9})$$

Controladores secundários de tensão (Fig. 4.10):

Malha aberta:

$$G_d = \frac{10}{(s + 10)} \quad (\text{A.10})$$

Malha aberta com controlador:

$$G_{cEsec} G_d = \frac{1,74(s + 9)}{s(s + 10)} \quad (\text{A.11})$$

Malha fechada:

$$\begin{aligned} G_{Esec} &= \frac{G_{cEsec} G_d}{1 + G_{cEsec} G_d} \\ &= \frac{1,74(s + 9)}{(s + 10,21)(s + 1,534)} \end{aligned} \quad (\text{A.12})$$

Rejeição ao desvio de frequência e tensão (Fig. 4.11):

$$\begin{aligned} G_{droop\omega} &= \frac{-m G_{FPB}}{1 + G_{PLL} G_{c\omega sec} G_d} \\ &= \frac{-0,6283s(s + 10)^2}{(s + 62,83)(s + 1,568)(s^2 + 18,43s + 86,1)} \end{aligned} \quad (\text{A.13})$$

$$\begin{aligned} G_{droopE} &= \frac{-n G_{FPB}}{1 + G_{cEsec} G_d} \\ &= \frac{-0,6283s(s + 10)}{(s + 62,83)(s + 10,21)(s + 1,534)} \end{aligned} \quad (\text{A.14})$$

Controladores terciários de potência ativa (Fig. 4.13):

Malha aberta:

$$\frac{G_{\omega sec} G_{PLL} K_{P\delta} G_{FPB}}{s} = \frac{1,7864 \times 10^5 (s + 9)}{s(s + 62,83)(s + 1,568)(s^2 + 18,43s + 86,1)} \quad (\text{A.15})$$

Malha aberta com controlador:

$$\frac{G_{cP}G_{\omega sec}G_{PLL}}{sK_{P\delta}G_{FPB}} = \frac{178,64(s+9)}{s(s+62,83)(s+1,568)(s^2+18,43s+86,1)} \quad (A.16)$$

Malha fechada:

$$G_{Ptert} = \frac{178,64(s+9)}{(s+62,83)(s+1,298)(s+0,2279)(s^2+18,47s+86,47)} \quad (A.17)$$

Controladores terciários de potência reativa (Fig. 4.14):

Malha aberta:

$$G_{Esec}K_{QE_{pcc}}G_{FPB} = \frac{20608(s+9)}{(s+62,83)(s+10,21)(s+1,534)} \quad (A.18)$$

Malha aberta com controlador:

$$G_{cQ}G_{Esec}K_{QE_{pcc}}G_{FPB} = \frac{721,28(s+9)(s+1,4)}{s(s+62,83)(s+10,21)(s+1,534)} \quad (A.19)$$

Malha fechada:

$$G_{Qtert} = \frac{721,28(s+9)(s+1,4)}{(s+46,9)(s+18,83)(s+7,464)(s+1,379)} \quad (A.20)$$

Referências

- AGNOLETTO, E. J.; NEVES, R. V. A.; BASTOS, R. F.; MACHADO, R. Q.; OLIVEIRA, V. A. Fuzzy secondary controller applied to autonomous operated ac microgrid. In: **2016 European Control Conference (ECC)**. Aalborg: European Control Association, 2016. p. 1788–1793.
- AGNOLETTO, E. J. et al. Análise dos tempos de chaveamento dos modos de operação de um sistema de geração distribuída na ocorrência de ilhação. In: **XX Congresso Brasileiro de Automática, 2014**. Belo Horizonte: Sociedade Brasileira de Automática (SBA), 2014. p. 2361–2368.
- AGUIAR, C. R. et al. Frequency Fuzzy Anti-Islanding for Grid-Connected and Islanding Operation in Distributed Generation Systems. **IET Power Electronics**, 2015. v. 8, p. 1255–1262, July 2015.
- 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**, 2015. v. 64, p. 148–155, Jan. 2015.
- ANDALIB-BIN-KARIM, C.; LIANG, X.; ZHANG, H. Fuzzy secondary controller based virtual synchronous generator control scheme for interfacing inverters of renewable distributed generation in microgrids. **IEEE Transactions on Industry Applications**, 2017. PP, n. 99, Nov. 2017.
- BEVRANI, H.; SHOKOOHI, S. An Intelligent Droop Control for Simultaneous Voltage and Frequency Regulation in Islanded Microgrids. **IEEE Transactions on Smart Grid**, 2013. v. 4, n. 3, p. 1505–1513, Sept 2013.
- BIDRAM, A.; DAVOUDI, A. Hierarchical Structure of Microgrids Control System. **IEEE Transactions on Smart Grid**, 2012. v. 3, n. 4, p. 1963–1976, Dec 2012.
- BIDRAM, A.; LEWIS, F.; DAVOUDI, A. Distributed Control Systems for Small-Scale Power Networks: Using Multiagent Cooperative Control Theory. **IEEE Control Systems**, 2014. v. 34, n. 6, p. 56–77, Dec 2014.
- BUSO, S.; MATTAVELLI, P. Digital control in power electronics, 2nd edition. **Synthesis Lectures on Power Electronics**, 2015. v. 5, n. 1, p. 1–229, 2015.
- CAI, H.; HU, G. Distributed Nonlinear Hierarchical Control of AC Microgrid via Unreliable Communication. **IEEE Transactions on Smart Grid**, 2017. n. 99, 2017.

CHEN, M.; XIAO, X. Hierarchical frequency control strategy of hybrid droop/vsg-based islanded microgrids. **Electric Power Systems Research**, 2018. v. 155, 2018.

DELGHAVI, M. B.; YAZDANI, A. A Unified Control Strategy for Electronically Interfaced Distributed Energy Resources. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 2012. v. 27, n. 2, p. 803–812, April 2012.

DÍAZ-GONZÁLEZ, F.; HAU, M.; SUMPER, A.; GOMIS-BELLMUNT, O. Coordinated operation of wind turbines and flywheel storage for primary frequency control support. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, 2015. v. 68, n. 0, p. 313–326, 2015.

DOUCETTE, R. T.; MCCULLOCH, M. D. A Comparison of High-Speed Flywheels, Batteries, and Ultracapacitors on the Bases of Cost and Fuel Economy as the Energy Storage System in a Fuel Cell Based Hybrid Electric Vehicle. **Journal of Power Sources**, 2011. v. 196, n. 3, p. 1163–1170, 2011.

DÍAZ, N. L.; DRAGICEVIC, T.; VASQUEZ, J. C.; GUERRERO, J. M. Intelligent Distributed Generation and Storage Units for DC Microgrids; A New Concept on Cooperative Control Without Communications Beyond Droop Control. **IEEE Transactions on Smart Grid**, 2014. v. 5, n. 5, p. 2476–2485, Sept 2014.

DÍAZ, N. L.; VASQUEZ, J. C.; GUERRERO, J. M. A communication-less distributed control architecture for islanded microgrids with renewable generation and storage. **IEEE Transactions on Power Electronics**, 2018. v. 33, n. 3, p. 1922–1939, Março 2018.

GAO, Y.; AI, Q. Distributed cooperative optimal control architecture for ac microgrid with renewable generation and storage. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, 2018. v. 96, p. 324 – 334, 2018.

GUERRERO, J. M.; CHANDORKAR, M.; LEE, T.; LOH, P. C. Advanced Control Architectures for Intelligent Microgrids – Part I: Decentralized and Hierarchical Control. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 2013. v. 60, n. 4, p. 1254–1262, April 2013.

GUERRERO, J. M.; LOH, P. C.; LEE, T.-L.; CHANDORKAR, M. Advanced Control Architectures for Intelligent Microgrids – Part II: Power Quality, Energy Storage, and AC/DC Microgrids. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 2013. v. 60, n. 4, p. 1263–1270, April 2013.

HU, K.-W.; LIAW, C.-M. Development of a Wind Interior Permanent-Magnet Synchronous Generator-Based Microgrid and Its Operation Control. **IEEE Transactions on Power Electronics**, 2015. v. 30, n. 9, p. 4973–4985, Sept 2015.

IEEE Std 1547.2. IEEE application guide for IEEE Std 1547, IEEE standard for interconnecting distributed resources with electric power systems. 2009. p. 1–207, Apr. 2009.

JIN, Z.; MENG, L.; GUERRERO, J. M.; HAN, R. Hierarchical control design for a shipboard power system with dc distribution and energy storage aboard future more-electric ships. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, 2018. v. 14, n. 2, p. 703–714, Fev. 2018.

JOHNSON, B. B.; DHOPLÉ, S. V.; HAMADEH, A. O.; KREIN, P. T. Synchronization of Parallel Single-Phase Inverters With Virtual Oscillator Control. **IEEE Transactions on Power Electronics**, 2014. v. 29, n. 11, p. 6124–6138, Nov 2014.

KUNDUR, P. **Power System Stability and Control**. New York: McGraw-Hill, 1994.

LU, X. et al. Hierarchical Control of Parallel AC-DC Converter Interfaces for Hybrid Microgrids. **IEEE Transactions on Smart Grid**, 2014. v. 5, n. 2, p. 683–692, Mar. 2014.

MARAFÃO, F. P. **Análise e Controle da Energia Elétrica Através de Técnicas de Processamento Digital de Sinais**. 2004. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual de Campinas, 2004.

MICALLEF, A.; APAP, M.; SPITERI-STAINES, C.; GUERRERO, J. M.; VASQUEZ, J. C. Reactive Power Sharing and Voltage Harmonic Distortion Compensation of Droop Controlled Single Phase Islanded Microgrids. **IEEE Transactions on Smart Grid**, 2014. v. 5, n. 3, p. 1149–1158, May 2014.

NASIRIAN, V.; MOAYEDI, S.; DAVOUDI, A.; LEWIS, F. L. Distributed cooperative control of dc microgrids. **IEEE Transactions on Power Electronics**, 2015. v. 30, n. 4, p. 2288–2303, Abril 2015.

NEVES, R. V. A.; AGNOLETTI, E. J.; REIS, G. B.; MACHADO, R. Q.; OLIVEIRA, V. A. Analysis of the Maximum Available Time to Switch the Operation Control Mode of a Distributed Generation During an Islanding Occurrence. In: **2015 IEEE Eindhoven PowerTech (POWERTECH)**. Eindhoven: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2015.

NEVES, R. V. A.; MACHADO, R. Q.; OLIVEIRA, V. A.; BLAABJERG, F.; WANG, X. Fuzzy Secondary Controller for Autonomous Stand-Alone and Grid-Connected AC Microgrid. In: **IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society**. Florence: IEEE Industrial Electronics Society (IES), 2016. p. 7028–7033.

NEVES, R. V. A.; MACHADO, R. Q.; OLIVEIRA, V. A.; WANG, X.; BLAABJERG, F. Multitask fuzzy secondary controller for ac microgrid operating in stand-alone and grid-tied mode. **IEEE Transactions on Smart Grid**, 2019. v. 10, n. 5, p. 5640–5649, Sep. 2019.

NEZHAD, M. A.; BEVRANI, H. Frequency control in an islanded hybrid microgrid using frequency response analysis tools. **IET Renewable Power Generation**, 2018. v. 12, n. 2, p. 227–243, Fev. 2018.

NUTKANI, I. U.; LOH, P. C.; WANG, P.; BLAABJERG, F. Cost-Prioritized Droop Schemes for Autonomous AC Microgrids. **IEEE Transactions on Power Electronics**, 2015. v. 30, n. 2, p. 1109–1119, Feb 2015.

OLIVARES, D. E. et al. Trends in Microgrid Control. **IEEE Transactions on Smart Grid**, 2014. v. 5, n. 4, p. 1905–1919, July 2014.

- PARREIRA, W. A. et al. Small-Signal Analysis of Parallel Connected Voltage Source Inverters Using a Frequency and Voltage Droop Control Including an Additional Phase Shift. **Journal of Control, Automation and Electrical Systems**, 2014. v. 25, n. 5, p. 597–607, 2014.
- QUESADA, J.; SEBASTIÁN, R.; CASTRO, M.; SAINZ, J. A. Control of Inverters in a Low-Voltage Microgrid with Distributed Battery Energy Storage. Part I: Primary Control. **Electric Power Systems Research**, 2014. v. 114, p. 126–135, Apr. 2014.
- RAMLI, M. A. M.; HIENDRO, A.; TWAHA, S. Economic Analysis of PV/Diesel Hybrid System with Flywheel Energy Storage. **Renewable Energy**, 2015. v. 78, n. 0, p. 398–405, 2015.
- RASHID, M. H. **Power Electronics: Circuits, Devices & Applications**. [S.l.]: Pearson Education, 2013.
- RAY, P. K.; MOHANTY, S. R.; KISHOR, N. Dynamic Modeling and Control of Renewable Energy Based Hybrid System for Large Band Wind Speed Variation. In: **Proc. IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe), 2010**. Gothenburg: IEEE Power & Energy Society (PES), 2010. p. 1–6.
- _____. Proportional-integral controller based small-signal analysis of hybrid distributed generation systems. **Energy Conversion and Management**, 2011. v. 52, n. 4, p. 1943–1954, 2011.
- REIS, G. B.; NEVES, R. V. A.; AGUIAR, C. R.; MACHADO, R. Q.; OLIVEIRA, V. A. A Fuzzy Control Strategy for a Diesel Generating Set under Stand-alone and Grid-Connected Operations. **Journal of Control, Automation and Electrical Systems**, 2014. v. 25, n. 2, p. 174–183, 2014.
- REY, J. M.; MARTÍ, P.; VELASCO, M.; MIRET, J.; CASTILLA, M. Secondary switched control with no communications for islanded microgrids. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 2017. v. 64, n. 11, p. 8534–8545, Nov. 2017.
- RIVERSO, S.; TUCCI, M.; VASQUEZ, J. C.; GUERRERO, J. M.; FERRARI-TRECATE, G. Stabilizing plug-and-play regulators and secondary coordinated control for ac islanded microgrids with bus-connected topology. **Applied Energy**, 2018. v. 210, p. 914 – 924, 2018.
- ROCABERT, J.; LUNA, A.; BLAABJERG, F.; RODRÍGUEZ, P. Control of Power Converters in AC Microgrids. **IEEE Transactions on Power Electronics**, 2012. v. 27, n. 11, p. 4734–4749, Nov. 2012.
- SANJARI, M. J.; GHAREHPETIAN, G. B. Small Signal Stability Based Fuzzy Potential Function Proposal for Secondary Frequency and Voltage Control of Islanded Microgrid. **Electric Power Components and Systems**, 2013. v. 41, n. 5, p. 485–499, 2013.
- SHAFIEE, Q.; NASIRIAN, V.; VASQUEZ, J. C.; GUERRERO, J. M.; DAVOUDI, A. A Multi-Functional Fully Distributed Control Framework for AC Microgrids. **IEEE Transactions on Smart Grid**, 2017. n. 99, 2017.

- SHAFIIEE, Q. et al. Robust Networked Control Scheme for Distributed Secondary Control of Islanded Microgrids. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 2014. 61, n. 10, p. 5363–5374, Oct. 2014.
- SKOGESTAD, S.; POSTLETHWAITE, I. **Multivariable feedback control: analysis and design**. [S.l.]: Wiley New York, 2007.
- WANG, L.; HU, Y.; CHEN, Z. Q-V droop control using fuzzy logic and reciprocal characteristic. **International Journal of Smart Grid and Clean Energy**, 2014. v. 3, n. 1, p. 88–95, Jan. 2014.
- WU, W.-Y.; GUO, X.-Q.; GU, H.-R. Phase Locked Loop and Synchronization Methods for Grid-Interfaced Converters: A Review. **Przegląd Elektrotech. (Elect. Rev.)**, 2011. v. 87, n. 4, p. 182–187, Apr 2011.
- XIA, Y.; PENG, Y.; WEI, W. Triple droop control method for ac microgrids. **IET Power Electronics**, 2017. v. 10, n. 13, p. 1705–1713, Oct. 2017.
- XIA, Y.; WEI, W.; YU, M.; WANG, X.; PENG, Y. Power management for a hybrid ac/dc microgrid with multiple subgrids. **IEEE Transactions on Power Electronics**, 2018. v. 33, n. 4, p. 3520–3533, April 2018.