

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROJETO DE GRADUAÇÃO**

WAGNER TRARBACH FRANK

**OPERAÇÃO DE UM CONVERSOR MULTIFUNCIONAL EM
UMA MICRORREDE DE ENERGIA ELÉTRICA**

VITÓRIA
2020

WAGNER TRARBACH FRANK

**OPERAÇÃO DE UM CONVERSOR MULTIFUNCIONAL EM UMA
MICRORREDE DE ENERGIA ELÉTRICA**

Parte manuscrita da Proposta de Projeto de Graduação do aluno **Wagner Trarbach Frank**, apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Hélio Marcos André Antunes

Coorientadora: Profa. Dra. Tiara Rodrigues Smarssaro de Freitas

VITÓRIA
2020

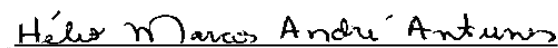
WAGNER TRARBACH FRANK

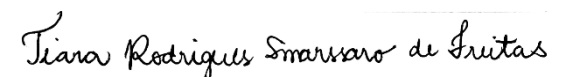
**OPERAÇÃO DE UM CONVERSOR MULTIFUNCIONAL EM UMA
MICRORREDE DE ENERGIA ELÉTRICA**


Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **Wagner Trarbach Frank**, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

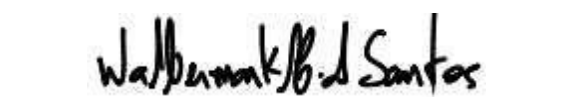
Aprovada em 18, de dezembro de 2020.

COMISSÃO EXAMINADORA:


Prof. Dr. Hélio Marcos André Antunes
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador


Profa. Dra. Tiara Rodrigues Smarssaro de Freitas
Universidade Federal do Espírito Santo
Coorientadora


Prof. Dr. Vinícius Secchin de Melo
Instituto Federal do Espírito Santo
Examinador


Prof. Dr. Walbermark Marques dos Santos
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador

Aos meus pais pelo apoio em todos os momentos da minha trajetória acadêmica.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Deus, que permitiu que tudo isso fosse possível, ao longo da minha vida, e não somente nestes anos como universitário.

Aos meus pais e irmã, a quem devo gratidão eterna por tudo que fizeram ao longo de toda a minha vida. É impossível expressar em poucas palavras o quão dedicados eles foram à minha formação.

Aos meus orientadores, Prof. Dr. Hélio Marcos André Antunes e Profa. Dra. Tiara Rodrigues de Freitas, pela dedicação e orientação deste trabalho. Seus ensinamentos foram indispensáveis, bem como no meu amadurecimento como profissional.

Agradeço a universidade, pela oportunidade de fazer o curso e me proporcionar um ambiente de aprendizado que levarei para a vida toda.

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

RESUMO

Atualmente, o setor elétrico vem vivenciando uma expansão na geração distribuída, com ampla aplicação em redes de baixa tensão. Dentro desse contexto, as microrredes vêm ganhando destaque. Uma microrrede é formada por um conjunto de microfones de geração, cargas elétricas e elementos armazenadores de energia, que podem operar no modo conectado à rede ou no modo ilhado. Nas microrredes, os conversores eletrônicos desempenham funções distintas, sendo classificados como formador de rede, suporte à rede e supridor de rede. Nesse cenário, a aplicação de conversores multifuncionais tem chamado a atenção pois, utilizando a mesma interface de potência do gerador distribuído, é possível agregar mais de uma função na microrrede. Este trabalho analisa a aplicação de um conversor multifuncional em uma microrrede CA com controle centralizado do tipo mestre-escravo. Em todos os modos de operação, o conversor é alocado em paralelo com a microrrede. No modo conectado à rede, o conversor proposto exerce função de suporte provendo compensação harmônica e correção do fator de potência. No modo ilhado, o conversor atua como formador de rede criando uma referência de tensão e frequência para a microrrede. O conversor multifuncional também auxilia na transição entre os modos de operação da microrrede. Um modelo computacional da microrrede, bem como todos os resultados de operação do conversor são apresentados por meio do *software Matlab/Simulink*. Os resultados alcançados destacam que o conversor multifuncional é uma configuração promissora, com a capacidade de desempenhar múltiplas funcionalidades.

Palavras-chave: Geração distribuída. Microrrede. Microfontes. Conversor multifuncional. Conversor formador de rede. Conversor suporte à rede. Conversor supridor de rede.

ABSTRACT

Currently, the electricity sector has been experiencing an expansion of distributed generation, with wide application in low voltage systems. Within this context, microgrids have been gaining prominence. A microgrid is formed by a set of generation micro-sources, electrical loads and energy storage elements, which can operate in connected mode or islanded mode. In microgrids, electronic converters perform different functions, being classified as grid-feeding, grid-forming and grid-supporting. In this scenario, the application of multifunctional converters has attracted attention because, using the same power interface as the distributed generator, it is possible to add more than one function in the microgrid. This work analyzes the application of a multifunctional converter in an AC microgrids with centralized control of the master-slave type. In all operating modes, the converter is allocated in parallel with the microgrid. In the connected mode, the proposed converter acts as a support function providing harmonic compensation and power factor correction. In island mode, the converter acts as a grid-forming, creating a voltage and frequency reference for the microgrid. The multifunctional converter also assists in the transition between the microgrid operating modes. A computational model of the microgrid, as well as all the results of operation of the converter are presented using the Matlab / Simulink software.

Keywords: Distributed generation. Microgrids. Microsources. Multifunctional converter. Grid-feeding converter. Grid-forming converter. Grid-supporting converter.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo de geração centralizada, transmissão e distribuição.....	14
Figura 2 – Modelo de configuração de uma microrrede CA.....	16
Figura 3 – Configuração básica de uma microrrede em CA.....	21
Figura 4 – Representação de cargas elétricas: (a) carga linear; (b) carga não-linear.....	22
Figura 5 – Microfontes de geração de energia elétrica.....	23
Figura 6 – Estrutura hierárquica de controle em uma microrrede.....	24
Figura 7 – Configuração do (a) conversor fonte de tensão e do (b) conversor fonte de corrente.....	28
Figura 8 – Configuração do conversor supridor de rede.....	29
Figura 9 – Supridor de rede com topologia VSI.....	29
Figura 10 – Controle monofásico do conversor supridor de rede.....	30
Figura 11 – Configuração do conversor formador de rede.....	31
Figura 12 – Representação do conversor monofásico formador de rede.....	31
Figura 13 – Conversor de suporte à rede como (a) fonte de tensão e (b) fonte de corrente....	32
Figura 14 – Conversor multifuncional conectado à rede elétrica.....	33
Figura 15 – Microrrede com conversor multifuncional.....	35
Figura 16 – Modos de operação do conversor multifuncional: (a) modo I; (b) modo II; (c) modo III; (d) modo IV.....	37
Figura 17 – Estrutura de controle mestre-escravo.....	38
Figura 18 – Diagrama de conexões e sensores do conversor multifuncional.....	40
Figura 19 – Esquemático do controle do conversor multifuncional proposto.....	41
Figura 20 – Diagrama de controle para operação como uma fonte de corrente controlada.....	41
Figura 21 – Diagrama de Bode da malha de corrente da função de transferência de malha aberta.....	43
Figura 22 – Diagrama de Bode da malha de corrente da função de transferência de malha fechada.....	43
Figura 23 – Diagrama de controle para operação como uma fonte de tensão controlada.....	44
Figura 24 – Diagrama de Bode da malha de tensão da função de transferência de malha aberta.....	45
Figura 25 – Diagrama de Bode da malha de tensão da função de transferência de malha fechada.....	45
Figura 26 – Bloco para referência de tensão utilizado no conversor multifuncional.....	46

Figura 27 – Bloco para referência de corrente utilizado no conversor multifuncional	47
Figura 28 – Resposta em frequência do filtro	49
Figura 29 – Resposta em frequência da FTMA.....	50
Figura 30 – Resposta em frequência da função de transferência de malha aberta para diferentes valores de ganhos do controlador repetitivo	51
Figura 31 – Configuração da microrrede monofásica em estudo	52
Figura 32 – Modelo computacional do sistema completo do CMF.....	53
Figura 33 – Bloco do conversor multifuncional.....	54
Figura 34 – Resultados do cenário I com forma de onda da tensão (V_s) e corrente (I_s) na rede.....	55
Figura 35 – Resultados do cenário I com forma de onda da tensão (VMR) e corrente (IMR) na microrrede.....	55
Figura 36 – Comparação do espectro da corrente na rede com filtro e sem filtro.....	57
Figura 37 – Resultado da resposta da malha de corrente.....	57
Figura 38 – Resultado da tensão na rede e corrente na rede	58
Figura 39 – Resultado da corrente na rede e corrente na microrrede	59
Figura 40 – Resposta da malha de tensão de referência.....	60
Figura 41 – Resposta da malha de tensão	60
Figura 42 – Potência ativa na microrrede no modo ilhado	61
Figura 43 – Potência reativa na microrrede no modo ilhado	62
Figura 44 – Tensão e corrente na microrrede no modo ilhado.....	62
Figura 45 – Corrente na carga no modo ilhado	63
Figura 46 – Resultado da corrente no gerador distribuído	63
Figura 47 – Resultado da resposta da malha de tensão	64
Figura 48 – Resultado da tensão na rede e corrente na rede	65
Figura 49 – Resultado da corrente na microrrede e da corrente na rede.....	65
Figura 50 – Resultado da tensão de referência do controle.....	66
Figura 51 – Resultado da corrente de referência do controle....	Erro! Indicador não definido.

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Modos de operação do conversor proposto.....	36
Quadro 2 – Parâmetros para simulação do conversor multifuncional	53
Quadro 3 – Comparação de distorção harmônica e fator de potência no cenário I.....	56

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AT	Alta tensão
BT	Baixa tensão
CA	Corrente alternada
CC	Corrente contínua
CCMR	Centro de controle da microrrede
CE	Chave estática
CFR	Conversor formador de rede
CL	Controlador Central
CR	Controle repetitivo
CSR	Conversor supridor de rede
CSUR	Conversor de suporte à rede
FC	Fonte de corrente
fp	Fator de potência
FPB	Filtro passa-baixa
FTMA	Função de transferência de malha aberta
FTMF	Função de transferência de malha fechada
GD	Geração distribuída
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
MF	Microfonte
MPPT	<i>Maximum power point tracker</i>
MR	Microrrede
MT	Média tensão
PAC	Ponto de acoplamento comum
PI	Proporcional-integral
PQ	Potências ativa e reativa
pu	Por unidade
QEE	Qualidade da energia elétrica
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo
V-f	Tensão e frequência
VSI	<i>Voltage source inverter</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

$v_s(t)$	Tensão da rede de distribuição (V)
Z_s	Impedância da rede de distribuição (V)
$V_{cc}(t)$	Tensão instantânea da microfona (V)
v_o	Tensão instantânea sobre o capacitor (V)
R	Valor da resistência do resistor (Ω)
$i_{cc}(t)$	Corrente instantânea do conversor (A)
Z_s	Impedância da carga (V)
$i_l(t)$	Corrente instantânea no indutor (A)
P_{ref}	Potência ativa de referência do controle do conversor (W)
Q_{ref}	Potência reativa de referência do controle do conversor (var)
P_o	Potência ativa da rede de distribuição (W)
Q_o	Potência reativa da rede de distribuição (var)
V_{s_pll}	Tensão de sincronização da rede (V)
C	Valor da capacitância do capacitor (F)
L	Valor da indutância do indutor (H)
S_n	Potência do VSI monofásico (VA)
f	Frequência elétrica fundamental (Hz)
f_{sw}	Frequência de chaveamento do conversor (Hz)
ΔI_l	Máximo <i>ripple</i> de corrente (A)
V_{ref}	Tensão de referência do controle do conversor (V)
I_{ref}	Tensão de referência do controle do conversor (A)
V_{oMC}	Tensão sobre o capacitor do controle do conversor (V)
I_{oMC}	Corrente no capacitor do controle do conversor (A)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Justificativa	17
1.2	Objetivo Geral	18
1.3	Objetivos Específicos	18
1.4	Metodologia.....	19
1.5	Organização do Trabalho.....	19
2	AS MICRORREDES DE ENERGIA ELÉTRICA.....	21
2.1	Microrredes.....	21
2.2	Microfontes de Energia Elétrica.....	23
2.3	Controle das Microrredes.....	24
2.4	Modos de Operação das Microrredes	25
2.5	Comentários Sobre as Microrredes de Energia Elétrica.....	26
3	OS CONVERSORES ELETRÔNICOS NA MICRORREDE CA	27
3.1	Conversores Eletrônicos	27
3.2	O Conversor Supridor de Rede.....	28
3.3	O Conversor Formador de Rede.....	30
3.4	O Conversor de Suporte à Rede.....	32
3.5	O Conversor Multifuncional	33
3.6	Comentários Sobre os Conversores Eletrônicos na Microrrede CA.....	34
4	O CONVERSOR MULTIFUNCIONAL NA MICRORREDE CA	35
4.1	O Conversor Multifuncional Proposto.....	35
4.2	Modos de Operação do Conversor Multifuncional	36
4.3	Controle Mestre-Escravo.....	38
4.4	Projeto do Filtro LC	39
4.5	Controle do Conversor Multifuncional.....	40
4.5.1	Controle da Malha de Corrente	41
4.5.2	Controle Malha de Tensão	43
4.5.3	Referência de Tensão	45
4.5.4	Referência de Corrente.....	46
4.5.5	Projeto do Controlador Repetitivo.....	49

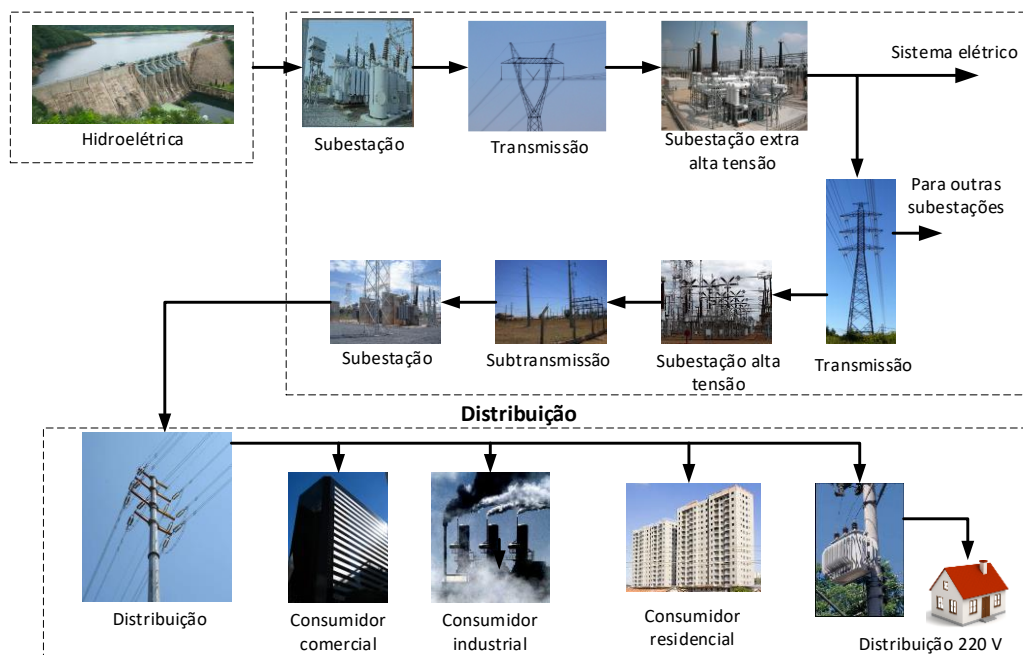
4.6	Comentários Sobre o Conversor Multifuncional na Microrrede CA	51
5	ANÁLISE E OPERAÇÃO DO CONVERSOR MULTIFUNCIONAL	52
5.1	Microrrede com Conversor Multifuncional Monofásico.....	52
5.1.1	Cenário I - Filtro Ativo Paralelo.....	54
5.1.2	Cenário II - Transição para Modo Ilhado.....	58
5.1.3	Cenário III - Operação no Modo Ilhado.....	61
5.1.4	Cenário IV - Reconexão ao Modo Conectado à Rede	64
5.2	Comentários Sobre a Operação do Conversor Multifuncional.....	66
6	CONCLUSÕES.....	68
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	69

1 INTRODUÇÃO

Em 1833 entrava em operação a primeira usina hidroelétrica no Brasil, localizada no rio Ribeirão do Inferno, em Diamantina-MG, com o objetivo de atender à mineradora Santa Maria. Em 1889, foi inaugurada a usina Bernardo Mascarenhas, em Juiz de Fora-MG, com uma potência de 250 kW, considerada a primeira usina de grande porte do Brasil. Porém, apenas a partir de 1950, o governo brasileiro passou a incentivar a produção de energia em grande escala, resultando na criação das grandes empresas estatais de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica no país (LOPES *et al.*, 2006).

Houve, a partir desse período, a construção de grandes usinas hidrelétricas, afastadas dos grandes centros consumidores, sendo necessário utilizar longas linhas de transmissão e distribuição para que a energia chegasse até o consumidor final, configurando, dessa forma, um sistema centralizado de produção da energia elétrica. Porém, com o crescente consumo, a expansão do sistema centralizado no Brasil passou a ser questionada, visto seu alto custo de geração e de transmissão (DRIESEN; VISSCHER, 2008). A Figura 1 ilustra um exemplo de geração centralizada, com todo o processo de transmissão e distribuição, até chegar ao consumidor final.

Figura 1 – Exemplo de geração centralizada, transmissão e distribuição



Fonte: Antunes (2018).

Nota: Adaptado pelo autor.

Como ocorrência, o Brasil passou pela primeira crise energética em 2001 (LOPES *et al.*, 2006), e um novo marco regulatório no setor energético brasileiro foi criado, com o objetivo de atrair investimentos, principalmente na área de geração. Surge então um novo conceito, a geração distribuída (GD), que é caracterizada como a geração de energia descentralizada, por meio de sistemas geradores que ficam próximos ou até mesmo na própria unidade consumidora e que são ligados à rede elétrica. Portanto, essa modalidade difere da geração centralizada, onde as grandes usinas geradoras são responsáveis pela produção e a enviam aos consumidores por meio das linhas e redes de transmissão, chegando até eles pelas distribuidoras locais (LASSETER, 2002).

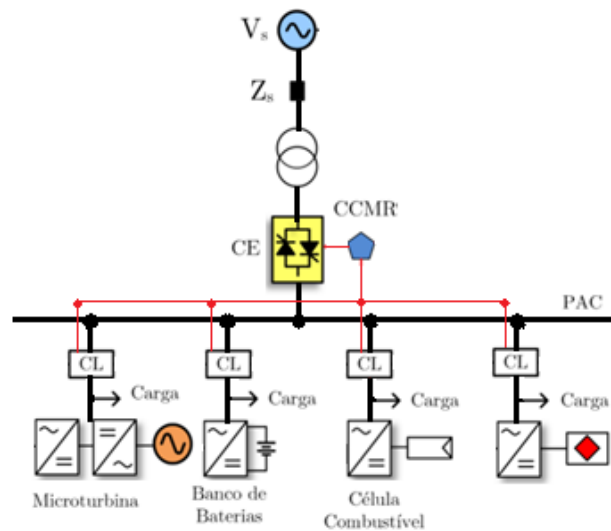
Essa modalidade de geração de energia pelo próprio consumidor foi estabelecida com a Resolução Normativa Nº 482 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), a qual entrou em vigor em 17 de abril de 2012. A partir da regulamentação e da necessidade de minimizar as perdas na transmissão e distribuição, o investimento no setor elétrico brasileiro de GD cresceu significativamente. Como resultado, em 2019, o Brasil ultrapassou a marca de 1 gigawatt de potência instalada em micro e minigeração distribuída de energia elétrica, sendo a energia solar fotovoltaica, a fonte mais utilizada pelos consumidores brasileiros (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2019). Essa grande inserção de GD de pequeno porte trouxe ao setor elétrico um novo conceito: a microrrede (MR).

Entende-se por microrrede, o sistema elétrico composto de várias pequenas unidades geradoras com centenas de kW ou menos, conectadas ao barramento de baixa tensão da rede central. Entretanto, a microrrede é um conjunto de GDs, as quais estão conectadas em paralelo alimentando suas respectivas cargas e ao mesmo tempo trocando potência entre si e o sistema de distribuição (LASSETER, 2002).

A microrrede é vista pelo sistema central como uma única célula de geração de energia, composta por várias outras células de geração. A inserção de uma microrrede na rede de distribuição traz os mesmos benefícios inerentes a GD, tais como, a redução de custos com transmissão, pequenos investimentos das instalações, maior confiabilidade no fornecimento de energia e a utilização de fontes renováveis de geração (AZEVEDO, 2013).

Entretanto, podem-se citar algumas desvantagens devido à conexão de uma microrrede à rede de distribuição; dentre elas, destacam-se: a necessidade de um rigoroso controle dos níveis de tensão e de estabilidade; a regulação do fator de potência; a preocupação com harmônicas; a avaliação de circuitos de proteção e a possibilidade de operação no modo ilhado, condição que se caracteriza por não ter a rede principal fornecendo potência a microrrede. Tais problemas devem ser levados em análise de forma a garantir segurança e máxima confiança no fornecimento de energia tanto para o lado do cliente quanto para a concessionária (LOPES *et al.*, 2006). A Figura 2 apresenta um diagrama esquemático de uma microrrede em corrente alternada (CA), formada por um conversor e diversas microfontes (MFs).

Figura 2 – Modelo de configuração de uma microrrede CA



Fonte: Produção do próprio autor.

Numa microrrede CA a operação dos conversores tem papel fundamental, e é possível encontrá-los com funcionalidades distintas, sendo usualmente classificados em três categorias: supridor de rede (CSR), formador de rede (CFR), e suporte à rede (CSUR). O primeiro conversor opera injetando potência ativa na rede, sendo controlado como uma fonte de corrente no modo PQ (potência ativa e reativa). Já o segundo opera como uma fonte de tensão controlada no modo V-f (tensão-frequência) suprindo cargas elétricas ilhadas (LOPES; MOREIRA; MADUREIRA, 2006). O terceiro possui a função de prover serviços ancilares, em termos da regulação de tensão e frequência, filtro ativo e outras funções que podem melhorar a qualidade da energia elétrica (QEE) (AZEVEDO, 2013).

Com a rede elétrica presente, o formador de rede se encontra sincronizado e aguardando o momento da sua entrada para operar no modo ilhado. Quando conectado à rede, pode operar fazendo o papel de suporte à rede contribuindo com a regulação de tensão no PAC da microrrede (AZEVEDO, 2013). Porém, em algumas condições isso pode não ocorrer, seja em caso de falha na rede ou quando precisa-se operar no modo ilhado. Com esse fato, o conversor formador de rede atua com controle em malha fechada, impondo em sua saída uma tensão e frequência de referência (ZHANG; CHEN, 2014).

No que se refere ao controle, é comum em microrredes o uso da arquitetura de controle centralizado do tipo mestre-escravo, em que o seu modo de operação ilhado é garantido pelo conversor formador de rede. Quando a rede elétrica principal está presente, o formador de rede pode operar provendo serviços ancilares, como um conversor de suporte à rede (BONALDO, 2015). Já quando a microrrede precisa operar no modo ilhado, por falha na rede ou por um ilhamento intencional, o controlador central da microrrede (CCMR) envia um sinal para o conversor formador de rede ser alterado para o modo fonte de tensão, e a chave estática (CE) isola a microrrede da rede principal (ANTUNES, 2018).

Dentre as frentes de estudo nas quais este trabalho se concentra, destaca-se a análise do conversor multifuncional. No modo conectado, o conversor proposto opera provendo serviços ancilares à rede ao qual está conectado, e no modo ilhado, impondo uma referência de tensão, que é uma estratégia de controle para restaurar a continuidade do serviço se algum evento não planejado ocorrer (ANTUNES, 2018). Diante dessa complexidade dos sistemas, surge a necessidade de ferramentas de simulação mais precisas cujos resultados sejam mais próximos possíveis dos obtidos em plantas reais. A simulação desses sistemas permite uma análise mais segura e preventiva, uma vez que testes experimentais se tornam inicialmente difíceis e de alto custo financeiro (ARAUJO, 2017).

1.1 Justificativa

A GD vem ganhando cada vez mais espaço no sistema de distribuição de energia elétrica atual em razão da crescente preocupação com o meio ambiente e com as limitações na geração de energia por fontes tradicionais de maneira centralizada. Considerando este novo modelo, a integração das unidades de GDs nas redes de distribuição, surge a preocupação com diversos

fatores já citados anteriormente, como: o controle dos níveis de tensão; as condições de regime permanente; análise de estabilidade; fator de potência; harmônicas; avaliação de circuitos de proteção e a possibilidade de operação no modo ilhado.

Nesse cenário, a aplicação de conversores multifuncionais tem chamado a atenção em microrredes, pois utilizando a mesma interface de potência do gerador distribuído, é também possível prover serviços ancilares, o que permite melhorar a eficiência e a QEE do sistema elétrico. No estudo envolvendo sistemas com inversores é importante realizar simulações computacionais para prever o comportamento dos dispositivos que o compõem, anteriormente à conexão real na rede elétrica, reduzindo custos e tempo de desenvolvimento.

1.2 Objetivo Geral

O objetivo geral desse trabalho é validar a operação de um conversor multifuncional monofásico, para que agregue em uma única estrutura as funcionalidades de suporte à rede e formador de rede em uma microrrede CA.

1.3 Objetivos Específicos

A seguir são listados os principais objetivos específicos:

- Estudar o modelo computacional de uma microrrede monofásica composta por um gerador distribuído, cargas lineares e não-lineares, e rede elétrica de baixa tensão, para avaliar a operação do conversor multifuncional;
- Avaliar um conversor multifuncional que possa desempenhar em momentos distintos as funcionalidades de conversor formador de rede e suporte à rede;
- Analisar um algoritmo de controle que permita uma mudança do modo de operação do conversor multifuncional, podendo esse operar como uma fonte de tensão ou fonte de corrente controlada de acordo com a necessidade do sistema.

1.4 Metodologia

O presente trabalho, do ponto de vista de sua natureza, é uma pesquisa aplicada, porque busca a aplicação prática de um conversor multifuncional em uma microrrede CA. Quanto aos objetivos, trata-se de uma pesquisa explicativa, uma vez que são discutidos fatores que causam a degradação da energia elétrica na rede e, conseqüentemente, identificação de soluções que atendam as normas vigentes de distribuição. Como procedimentos técnicos foram utilizados pesquisa bibliográfica para embasamento, em conjunto com pesquisas experimentais, com objeto de estudo e variáveis de influência definidos. Por fim, o problema proposto foi abordado de forma quantitativa.

1.5 Organização do Trabalho

A seção 1 apresenta uma introdução sobre a geração de energia no Brasil, o modo como era organizado na época e como foi preciso se adaptar, surgindo um novo tipo de modalidade, por consequência, uma nova regulamentação. Também são introduzidos os conceitos de microrrede e de conversores eletrônicos de potência.

Na seção 2 é realizada uma revisão bibliográfica sobre as microrredes de energia elétrica. São apresentados os aspectos fundamentais como configuração básica, aplicações, topologias, principais tipos de microfontes. Também são abordados os métodos de controle das microrredes, com as suas respectivas formas de operação, além de introduzir os conversores eletrônicos.

A terceira seção apresenta uma das principais configurações dos conversores eletrônicos para as microrredes CA. Primeiramente é detalhado o conversor supridor de rede, que opera como uma fonte de corrente controlada. Já os conversores formadores de rede, destacando a sua importância para a microrrede no modo ilhado e os conversores de suporte à rede, tem um papel muito importante no fornecimento de serviços ancilares. Por fim, é apresentado o conversor multifuncional, que pode agregar em um único inversor as funcionalidades dos conversores básicos da microrrede.

O conversor multifuncional é apresentado na seção 4, destacando uma configuração que pode desempenhar o papel de conversor de suporte à rede, e formador de rede em uma microrrede centralizada. Também é detalhada toda a estrutura de controle do conversor proposto.

Já na seção 5, são exibidos os principais resultados de simulação do conversor multifuncional. Como formador de rede, este pode gerar uma referência de tensão e frequência no modo ilhado da microrrede. Já provendo serviços ancilares, o conversor pode operar como filtro ativo paralelo, melhorando a QEE na microrrede. É também destacada a operação do conversor na transição intencional do modo conectado à rede para o modo ilhado, e vice-versa, com transição suave sem transitório de tensão e corrente na microrrede. Na última seção são apresentadas as principais conclusões do trabalho.

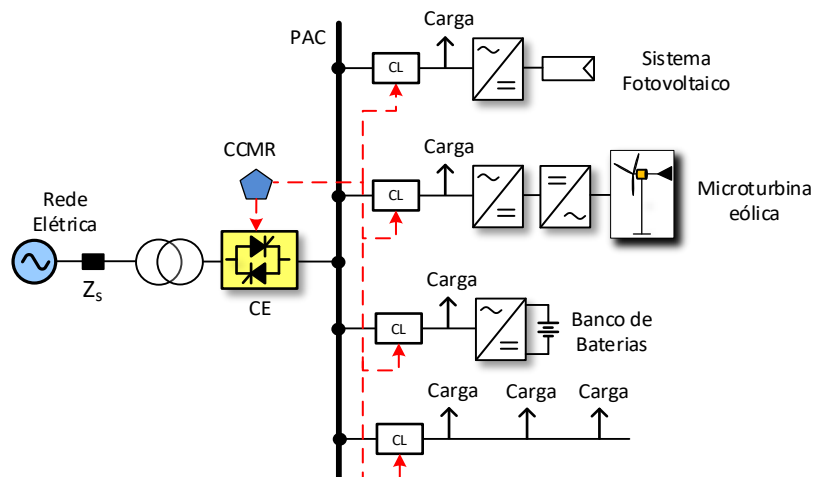
2 AS MICRORREDES DE ENERGIA ELÉTRICA

Microrredes é uma tecnologia em ascensão global que foram utilizadas décadas atrás como parte dos programas de eletrificação rural, principalmente nos países em desenvolvimento. O conceito de microrrede foi proposto pela Universidade de Wisconsin-Madison dos EUA, sendo definida como uma conexão de diversos alimentadores, com associação de cargas elétricas e diversas MFs conectadas a um barramento (LASSETER, 2002). Neste capítulo são apresentados alguns pontos relevantes no o decorrer do projeto, dentre eles, o conceito de microrrede, com suas principais definições e topologias. Posteriormente, são abordados de forma geral as principais MFs de GD, os sistemas de armazenamento de energia, os modos de operação e técnicas de controle.

2.1 Microrredes

O sistema elétrico ilustrado na Figura 3 detalha a arquitetura básica de uma microrrede, composta por três alimentadores radiais conectados à rede elétrica principal em BT, onde nestes alimentadores são acoplados alguns exemplos de subsistemas. Para a rede, o ponto de acoplamento comum (PAC) está localizado no lado de BT, mas também é possível encontrá-lo no lado de MT, dependendo da aplicação (ANTUNES, 2018).

Figura 3 – Configuração básica de uma microrrede em CA



Fonte: Produção do próprio autor.

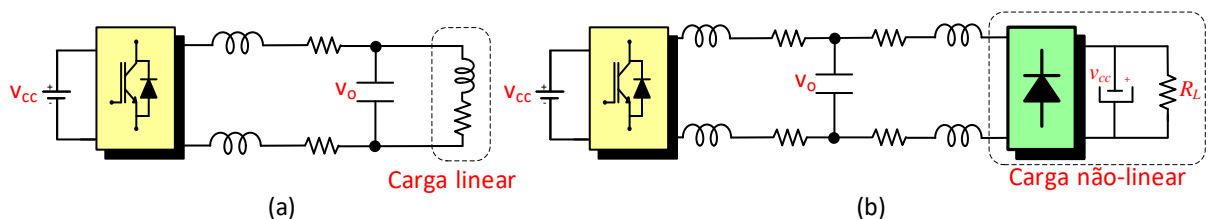
O CCMR é responsável por coordenar as MFs de GD, os sistemas de armazenamento de energia e as cargas elétricas (BEVRANI; WATANABE; MITANI, 2014). Outra função do CCMR é especificar as potências ativa e reativa que devem ser despachadas pelas MFs, além de controlar a tensão e frequência no PAC (EID, 2014). Cada MF e carga elétrica possui um controlador local (CL), com a função de controlar a produção e o armazenamento de energia, além de definir a demanda da carga (LOPES *et al.*, 2006).

Para uma microrrede que opera no modo de controle centralizado, os CLs são controlados pelo CCMR, por meio de um *set point*. Já no modo de controle descentralizado, ou seja, sem comunicação entre as MFs, os CLs operam tomando decisões independentes (EID; RAHIM, SEVARAJ, 2014). Desse modo, o controle dos conversores das MFs é de extrema importância, tanto sob o ponto de vista da produção de energia elétrica quanto para a estabilidade da microrrede (TABATABAEE; KARSHENAS; BAKHSHAI, 2011).

A fonte da microrrede é formada por um conversor supridor de rede (CSR), com capacidade de suprir parte das cargas elétricas. Também existe um conversor formador de rede (CFR), com habilidade de armazenar energia produzida pelo CSR, além de fornecer suporte ao sistema na condição de operação isolada da rede elétrica principal. A microrrede também é composta por uma chave estática (CE), que permite a operação ilhada e conectada à rede elétrica principal (ANTUNES, 2018).

Existem dois tipos de cargas elétricas que são acopladas na microrrede: do tipo linear e não-linear. Uma carga linear pode ser representada por uma impedância série RL do tipo constante; já cargas não-lineares, são formadas por elementos passivos e dispositivos semicondutores, como ilustrado na Figura 4 (POPOV; KARIMI, 2009).

Figura 4 – Representação de cargas elétricas: (a) carga linear; (b) carga não-linear



Fonte: Produção do próprio autor.

Uma solução utilizada para evitar harmônicos indesejáveis no sistema elétrico pode ser obtida por meio do uso de filtros passivos. Esta estrutura é formada pela associação de resistores, indutores e capacitores, sendo geralmente conectados em paralelo com a carga, fornecendo um caminho de baixa impedância para as correntes harmônicas na frequência de sintonia. Outra funcionalidade deste elemento é a correção do fator de potência, pois sua impedância na frequência fundamental é capacitiva (PAQUETTE; DIVAN, 2014).

2.2 Microfontes de Energia Elétrica

As microfontes de uma microrrede são unidades geradoras de potência entre 1 kW a 10 MW, localizadas próximas ao consumidor e em sua maioria são fontes alternativas e renováveis. Dentre todas as microfontes pode-se destacar: a eólica; a célula a combustível; a microcentral hidrelétrica; a fotovoltaica e a microturbina a gás (SILVA, 2011). A Figura 5 ilustra as principais microfontes utilizadas em uma microrrede.



Fonte: Melo e Nobrega (2017).

Como forma de adequar o Brasil às novas tecnologias de geração de energia e aos novos modelos de mercado que surgiam em outras partes do mundo, a ANEEL normatizou em 2012, a modalidade de minigeração e microgeração de energia elétrica. Neste modelo, a geração de energia elétrica é produzida pelo próprio consumidor e apresenta inúmeros benefícios, como aliar economia financeira, consciência socioambiental e autossustentabilidade.

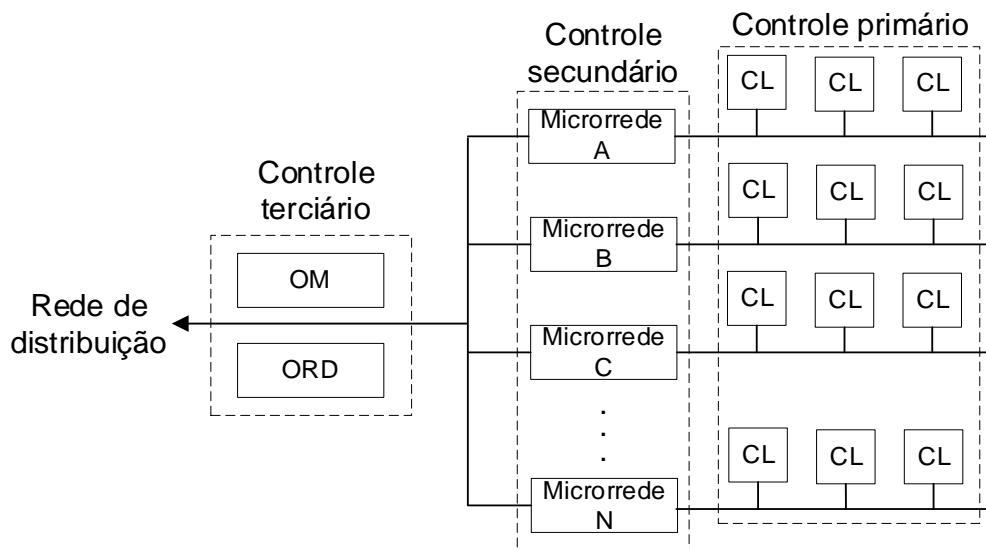
Uma MF conectada ao barramento CC de um inversor pode ser classificada como intermitente ou não-intermitente. No primeiro tipo, a fonte de energia pode ou não estar disponível integralmente ao longo do dia, como o sol e vento. Já as fontes não-intermitentes são aquelas

que podem ser acessadas a qualquer instante, permitindo assim injetar energia na rede elétrica independentemente de qualquer fenômeno ligado a natureza (NASCIMENTO, 2016).

2.3 Controle das Microrredes

O controle da microrrede é o centro de operações e tem como objetivo garantir que todas as suas funções sejam realizadas. Como pode ser visto na Figura 6, o controlador local (CL) dito como primário, possui como principal função, controlar as variáveis locais, como tensão, frequência, potência, cargas elétricas locais e as MFs de energia elétrica (ALLAF, 2010).

Figura 6 – Estrutura hierárquica de controle em uma microrrede



Fonte: Produção do próprio autor.

Já para um nível de controle secundário, acima do CL, existe o CCMR. Esse tem como função controlar a tensão e a frequência da microrrede, além de enviar o *set point* de potência ativa e reativa para as MFs despacháveis em um cenário de controle centralizado. Segundo o padrão IEEE Std. 1547.4, o CCMR também tem a função de prover os serviços auxiliares como regulação de carga, perdas de energia, reserva de carga, regulação de tensão e fonte de potência reativa.

O padrão recomenda ainda uma desconexão da microrrede da rede elétrica principal pelo CCRM quando a tensão estiver abaixo de 0,85 pu ou acima de 1,1 pu. Outro ponto importante do controle secundário é a transição da microrrede no modo ilhado para o modo conectado à

rede, com sincronismo dos desvios de tensão e frequência com a rede principal (BEVRANI; WATANABE; MITANI, 2014).

O nível de controle hierárquico mais alto em uma microrrede é o terciário, com a presença do operador da rede de distribuição (ORD). Possui como responsabilidade o gerenciamento da rede de distribuição em MT para o caso em que houver mais de uma microrrede presente na rede elétrica (BEVRANI; WATANABE; MITANI, 2014).

Uma microrrede quando isolada da rede, pode operar com o controle de todo o sistema de forma centralizada, ou seja, o formador de rede é o mestre, com controle no modo V-f, e os outros inversores atuam como escravos, com controle PQ. Para a condição em que a rede elétrica está presente, o mestre opera como fonte de corrente (FC), aguardando o momento para entrar em operação (WANG; GUERRERO; BLAABJERG, 2012).

O CCMR é responsável por garantir que a mudança na operação do formador de rede entre os modos PQ e V-f, e permita uma operação livre de transitórios na microrrede (WANG; GUERRERO; BLAABJERG, 2012). Também é importante destacar que a transição da microrrede do modo conectado para o modo ilhado ocorre, na maioria dos casos, com o mestre em paralelo com a rede elétrica (PARHIZI; LOTFI; KHODAEI, 2015).

2.4 Modos de Operação das Microrredes

O padrão IEEE Std 1547.4 define que uma microrrede pode operar conectado à rede elétrica principal, em transição para o modo ilhado, em ilhamento ou no modo de reconexão da microrrede.

Quando a microrrede opera no modo conectado à rede, tensão e frequência são impostas pela rede principal (ROCABERT; LUNA; BLAABJERG, 2012). Nessa condição, a microrrede pode estar suprindo total ou parcialmente as cargas, ou até mesmo injetando energia na rede (LOPES; MOREIRA; MADUREIRA, 2006).

No modo ilhado ou isolado, deve haver pelo menos um inversor eletrônico associado a um sistema de armazenamento operando no modo V-f, responsável por manter tensão e frequência

na microrrede dentro dos limites. Já os demais inversores das MFs operam no modo PQ, controlando potência ativa e reativa da microrrede (LOPES; MOREIRA; MADUREIRA, 2006).

A transição entre o modo interligado à rede para a operação isolada da microrrede deve ocorrer de forma rápida e sem transitórios, de maneira que a tensão e a frequência respeitem valores normalizados. O ilhamento pode ocorrer de modo intencional ou não-intencional (BHASKARA; CHOWDHURY, 2012). O primeiro tipo acontece quando a rede elétrica principal está em manutenção, ou por algum critério econômico, enquanto a segunda condição sucede por alguma contingência da rede.

Quando a microrrede está operando no modo ilhado, e é desejável a reconexão com a rede principal, deve haver um sistema supervisorio que é controlado pelo CCMR em conjunto com a CE. A reconexão da microrrede com a rede principal é feita somente quando esta estiver sincronizada, ou seja, com mesma amplitude de tensão, frequência e fase dentro de um limiar de tolerância (BEVRANI; WATANABE; MITANI, 2014).

2.5 Comentários Sobre as Microrredes de Energia Elétrica

Essa seção apresentou uma visão geral sobre microrredes, seu conceito, aplicações, principais tipos de MFs de energia elétrica, estrutura típica e modos de operação, além de introduzir os conversores eletrônicos conectados a ela. Assim, foram descritas as principais características inerentes a uma microrrede, que serão analisadas nesse trabalho.

3 OS CONVERSORES ELETRÔNICOS NA MICRORREDE CA

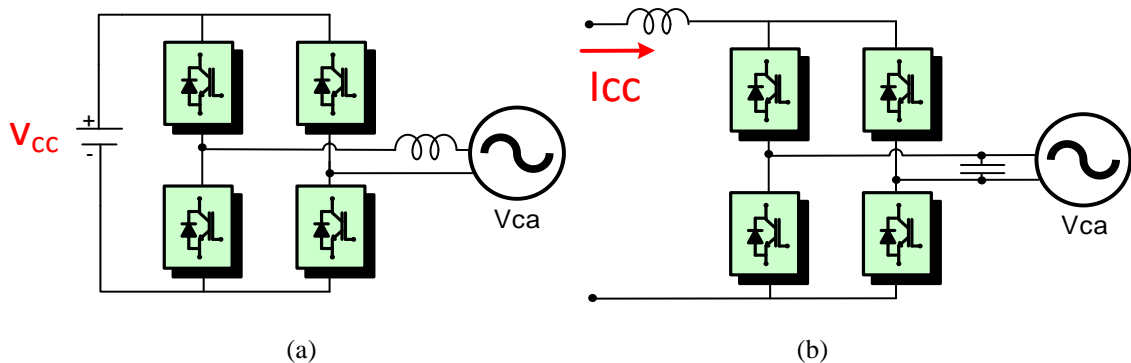
Nas microrredes, os conversores eletrônicos desempenham funções distintas, sendo classificados como formador de rede (CFR), suporte à rede (CSUR) e supridor de rede (CSR). O CSR opera como uma fonte de corrente no modo PQ e tem um papel importante, pois pode suprir parcialmente ou totalmente as cargas elétricas da microrrede. No entanto, para que sua operação seja feita sem a presença da rede elétrica principal, faz-se necessário o uso do CFR, onde sua função é impor tensão e frequência nos terminais da microrrede. Já o CSUR tem a função de prover serviços ancilares que podem melhorar a QEE.

3.1 Conversores Eletrônicos

As fontes primárias consideradas na microrrede produzem energia na forma de corrente contínua (CC). Entretanto, a microrrede é projetada para alimentar cargas em corrente alternada (CA), e para isso é necessária a conversão de CC produzida pelas fontes para CA, consumida pelas cargas. Os conversores são os responsáveis por realizar essa conversão. O principal papel dos inversores nos sistemas de geração distribuída é entregar energia elétrica à rede de distribuição em corrente alternada, dentro de padrões de qualidade adequados. O inversor deve fornecer uma tensão (ou corrente) alternada, com frequência, forma e amplitude definidas por algum sistema de controle (BONALDO, 2015).

Existem várias associações dos elementos da eletrônica de potência e topologias de conversores que permitem realizar a conversão de CC para CA ou vice-versa. Primeiramente, é possível diferenciar os conversores como sendo conversor fonte de tensão (VSI, do inglês *voltage source inverter*) ou conversor fonte de corrente (CSI, do inglês *current source inverter*). A Figura 7 mostra a topologia básica dos dois tipos de conversores considerando a disposição em ponte completa (LOPES *et al.*, 2006).

Figura 7 – Configuração do (a) conversor fonte de tensão e do (b) conversor fonte de corrente



Fonte: Produção do próprio autor.

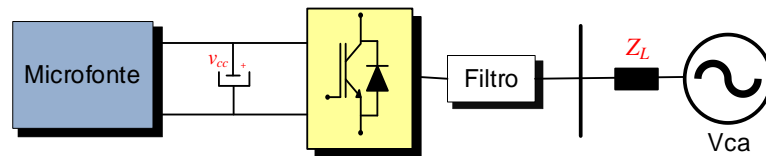
É denominado VSI, quando a tensão CC permanece constante na entrada, alimentado por uma fonte de tensão contínua e sua saída não depende da carga. O indutor na saída do VSI é responsável por fazer com que o mesmo se comporte como uma fonte de corrente. Um VSI também pode ser operado no modo controlado por corrente e, da mesma forma, um CSI pode ser operado no modo de controle de tensão (REZNIK; SIMÕES; MUYEEN, 2012).

Já o CSI é caracterizado pela corrente de entrada ser mantida constante, alimentado por uma fonte de corrente e um indutor de valor alto está conectado no lado de entrada. Vale ressaltar que uma fonte de tensão pode ser convertida em fonte de corrente conectando uma indutância em série e variando a tensão para obter a corrente desejada. Quando o conversor precisa operar como uma FC a corrente no indutor é controlada, já na operação como FT, a corrente no indutor e tensão são controladas (ROCABERT; LUNA; BLAABJERG, 2012).

3.2 O Conversor Supridor de Rede

O CSR possui como função converter a energia produzida por alguma MF, fornecendo à rede elétrica e desempenhando um importante papel no contexto da GD e das microrredes. O CSR é visto pela rede elétrica CA como uma fonte de corrente controlada, com alta impedância de entrada (ROCABERT; LUNA; BLAABJERG, 2012; AZEVEDO, 2013). Esse conversor eletrônico é sincronizado com a rede elétrica, permitindo que ele opere injetando potência ativa e reativa na rede. A Figura 8 apresenta os principais elementos que compõem o supridor de rede conectado à rede elétrica.

Figura 8 – Configuração do conversor supridor de rede

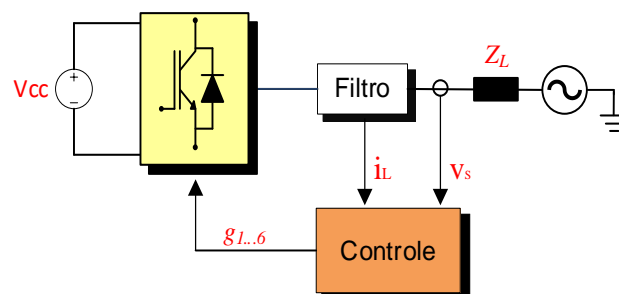


Fonte: Produção do próprio autor.

O supridor de rede é conectado à rede elétrica por meio de um filtro passivo, como ilustrado na Figura 8, que pode ser do tipo L, LC ou LCL, com o objetivo de reduzir o *ripple* de chaveamento do inversor. O mais comum é que o conversor eletrônico CC-CA seja um inversor com barramento do tipo VSI (ANTUNES, 2018). Em uma microrrede, o conversor supridor de rede pode operar recebendo um *set point* de potência ativa e reativa do CCMR, quando a MF de energia conectada ao barramento CC do inversor for do tipo não-intermitente. Para sincronizar o conversor com a rede elétrica é necessário o uso de um *phase locked loop* (PLL).

Para a condição em que a rede elétrica principal estiver ausente, o CSR deve detectar o ilhamento e deixar de operar, garantindo a operação segura no caso de manutenção da rede elétrica principal (AZEVEDO, 2013). O CSR tem um papel muito importante na microrrede, pois o mesmo opera como fonte de corrente injetando potência ativa, atendendo à demanda da carga ou até mesmo exportando energia para a rede elétrica principal, já que na maioria dos casos não possui armazenamento de energia (ROCABERT; LUNA; BLAABJERG, 2012). A Figura 9 apresenta uma configuração para o supridor de rede para a topologia VSI, com seu esquema de controle apresentado na Figura 10.

Figura 9 – Supridor de rede com topologia VSI

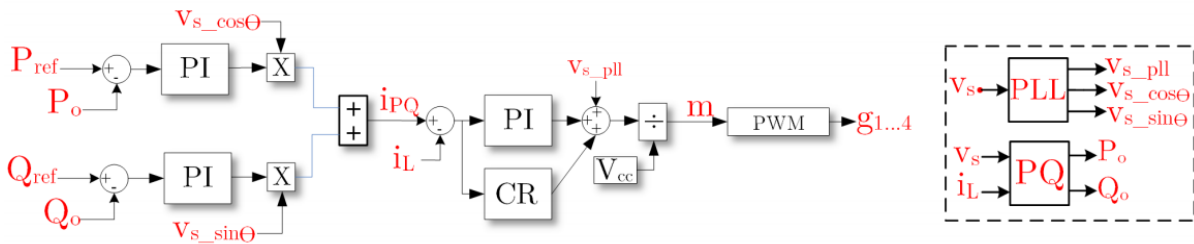


Fonte: Antunes (2018).

O controle em coordenadas naturais (abc) para a FC é apresentado na Figura 10, com operação em malha fechada e com um controlador PI. É utilizado um PLL monofásico responsável por

gerar os sinais $V_{s_cos\theta}$ e $V_{s_sin\theta}$, que produzem respectivamente uma componente em eixo direto e quadratura de corrente, além do sinal V_{s_pll} para sincronização com a rede. Já na malha de corrente é utilizada uma estrutura de controle PI em paralelo com o controle repetitivo (CR), para garantir o rastreamento com erro nulo para a entrada periódica.

Figura 10 – Controle monofásico do conversor supridor de rede



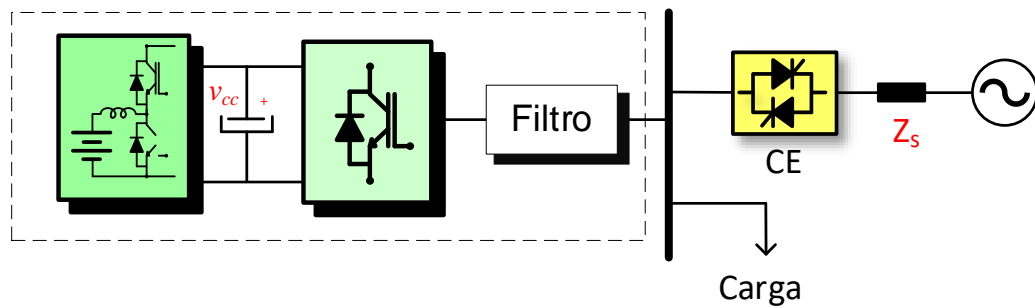
Fonte: Antunes (2018).

3.3 O Conversor Formador de Rede

O conversor formador de rede (CFR) é utilizado quando a rede elétrica principal não impõe tensão e frequência no PAC, seja em caso de falha na rede ou em uma microrrede operando no modo ilhado. Nestes modos, o CSR não garante valores nominais de tensão no PAC, porque sua saída tem característica de FC e precisaria de uma referência imposta pela rede (MESSENGER; ABTAHI, 2010).

Dentro deste contexto, o formador de rede se torna importante para a microrrede, atuando com controle em malha fechada, onde ele é responsável por impor em sua saída uma tensão e frequência de referência. Vale ressaltar que, diferente do supridor de rede, esse conversor possui uma pequena impedância de saída. A operação do CFR é inicializada por uma fonte ininterrupta de energia, que deve suprir a carga da rede, com o auxílio de um banco de baterias estacionárias. Em uma microrrede, quando a rede elétrica principal estiver ausente, um ou múltiplos formadores de rede podem impor uma referência para todos os supridores de rede e as cargas elétricas (ROCABERT; LUNA; BLAABJERG, 2012). A Figura 11 apresenta a configuração básica de um CFR.

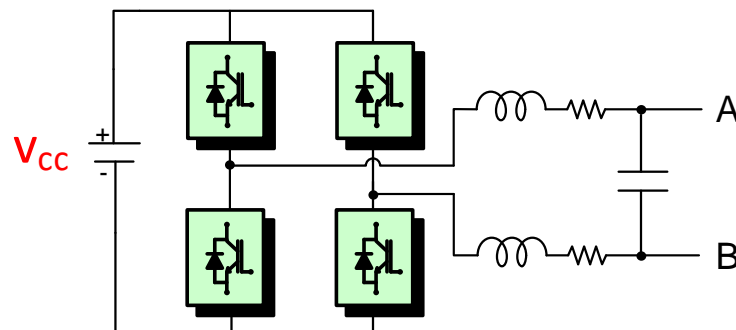
Figura 11 – Configuração do conversor formador de rede



Fonte: Produção do próprio autor.

O formador de rede da Figura 12 é formado por um VSI monofásico, com filtro passivo do tipo LC, garantindo uma tensão senoidal em sua saída. Para o lado CC do conversor serão consideradas apenas as configurações que utilizam um sistema de armazenamento de energia, com banco de baterias estacionárias. Assim, o barramento CC de cada VSI será representado por uma fonte de tensão ideal (MATOS; RIBEIRO; SILVA, 2014), como está demonstrado na Figura 12.

Figura 12 – Representação do conversor monofásico formador de rede



Fonte: Produção do próprio autor.

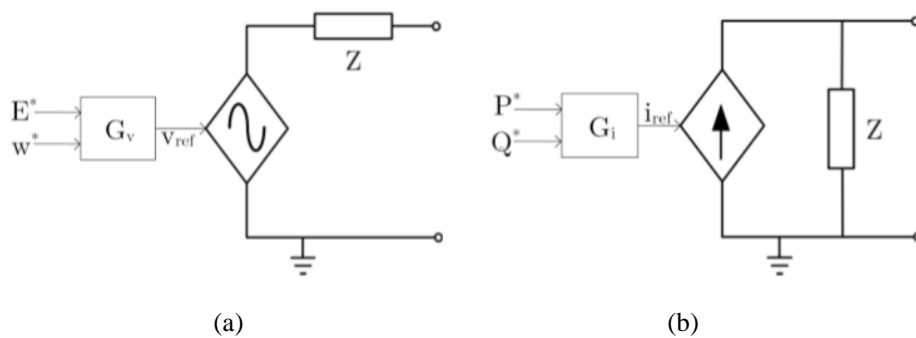
Um formador de rede também pode operar em uma microrrede com a rede elétrica principal presente, fazendo o papel de suporte à rede. Nesse caso, o conversor pode contribuir com a regulação de tensão no PAC da microrrede operando como uma FC, com a obrigatoriedade do sistema de armazenamento de energia, já que pode ser necessário absorver potência ativa da rede (AZEVEDO, 2013). Com a rede elétrica presente o formador de rede fica sincronizado com a mesma, aguardando o momento da sua entrada em operação no modo ilhado (ZHANG; CHEN, 2014).

3.4 O Conversor de Suporte à Rede

O terceiro conversor apresentado é nomeado como conversor de suporte à rede (CSUR), porque sua principal função é fornecer serviços ancilares ou auxiliares à microrrede, como regulação de tensão e frequência utilizando do controle de potência ativa e reativa produzida ou absorvida na saída do conversor. Dependendo da característica de impedância da microrrede, pode ser necessário armazenar potência ativa, o que obriga a presença de um sistema para armazenamento de energia (ROCABERT; LUNA; BLAABJERG, 2012). O CSUR pode exercer as mesmas funções que um CSR e o CFR, dependendo da sua topologia e do seu controle (VACILOTO; GONZATTI; FERREIRA, 2015).

Existem dois modos que o conversor de suporte à rede pode ser implementado. Na primeira configuração, como uma fonte de tensão comum e uma pequena impedância em série, conforme ilustrado na Figura 13(a). Um outro modo pode ser por meio de operação como FC, com uma alta impedância de saída e uma fonte de corrente controlada, exibida na Figura 13(b) (ARAÚJO, 2017; ROCABERT; LUNA; BLAABJERG, 2012).

Figura 13 – Conversor de suporte à rede como (a) fonte de tensão e (b) fonte de corrente



Fonte: Rocabert, Luna e Blaabjerg (2012).

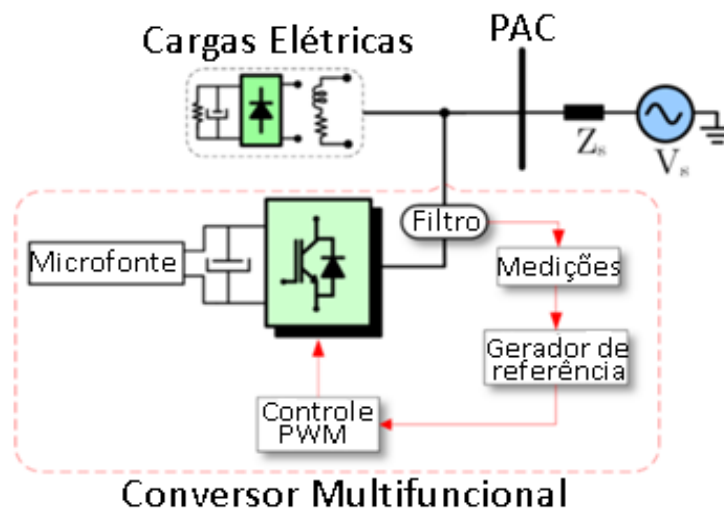
Uma condição para que o CSUR opere como uma FC é que haja pelo menos um formador de rede presente na microrrede. Já no modo fonte de tensão ocorre justamente o contrário, pois o mesmo pode operar também desempenhando a função de formador de rede com as características de um gerador síncrono (ROCABERT; LUNA; BLAABJERG, 2012).

3.5 O Conversor Multifuncional

O conversor multifuncional (CMF) é um tipo especial de inversor eletrônico conectada à rede que atraiu muita atenção nos últimos anos. Os CMFs não apenas geram energia para as GDs, mas também fornecem maiores funcionalidades, por meio de melhoria de qualidade de energia e de suporte. O conversor eletrônico ideal em uma microrrede é o multifuncional, já que se pode agrupar as três funções básicas: conversor formador de rede; supridor de rede; e de suporte à rede. Desse modo apenas um único conversor operaria em uma microrrede, contemplando assim todas as funcionalidades necessárias (WANG; GUERRERO; BLAABJERG, 2012).

Teke e Latran (2014) apresentam em seu artigo uma ampla revisão bibliográfica sobre os conversores multifuncionais aplicados em GD, com relação à topologia, controle e funcionalidades. A Figura 14 apresenta um conversor multifuncional conectado à rede elétrica principal, alimentado por uma MF de GD conectada em seu barramento CC. O conversor é conectado em paralelo com a rede elétrica e pode desempenhar as funções de um filtro ativo paralelo, além da injeção de potência ativa.

Figura 14 – Conversor multifuncional conectado à rede elétrica



Fonte: Teke e Latran (2014).

Atualmente, existe uma tendência de que os conversores multifuncionais não desempenhem apenas funções básicas de suporte à rede e supridor de rede, mas também de formador de rede. Um exemplo é apresentado por Bonaldo (2015), no qual é adicionado um banco de baterias em um conversor fotovoltaico. Esse gerador distribuído pode operar como um supridor de rede ou

formador de rede, dependendo das condições operacionais da rede elétrica. Esse conversor pode propiciar a operação de um sistema elétrico residencial no modo ilhado, sem a necessidade da rede elétrica principal.

Um conversor, denominado de *utility interface* aplicado em uma microrrede, pode prover serviços ancilares quando conectado à rede, como filtro ativo paralelo, e no modo ilhado assume a função de gerador na rede elétrica como formador de rede (TENTI; CALDOGNETTO; BUSO, 2014). Outra funcionalidade do conversor é a criar uma transição do modo ilhado para conectado e vice-versa de forma suave e sem transitório de tensão/corrente.

Se por algum motivo a microrrede precisar trabalhar no modo ilhado, o CMF utiliza uma *phase locked loop* (PLL), adaptada para detectar a condição de perda na rede elétrica. O PLL é um sistema de controle que gera a partir de um sinal de entrada, um sinal de saída com frequência e fase instantâneas em sincronismo com o sinal amostrado, provocando um regime permanente desejado. Em uma microrrede, quando a rede elétrica principal estiver ausente, um ou múltiplos formadores de rede podem impor uma referência para todos os supridores de rede e as cargas elétricas, dependendo da arquitetura de controle da microrrede (ROCABERT; LUNA; BLAABJERG, 2012).

3.6 Comentários Sobre os Conversores Eletrônicos na Microrrede CA

Nesta seção foram apresentadas as principais configurações dos conversores eletrônicos para as microrredes CA. Foi apresentado o conversor supridor de rede, com suas topologias básicas e técnicas de controle. Os conversores formadores de rede, destacando a sua importância para a microrrede no modo ilhado e o conversor de suporte à rede, que tem um papel muito importante na microrrede CA, com fornecimento de serviços ancilares ou auxiliares. Por fim, foi apresentado o conversor multifuncional, que como principal característica, pode exercer múltiplas funções, desde serviços ancilares, injeção de potência ativa, geração de uma referência de tensão e frequência para microrrede.

4 O CONVERSOR MULTIFUNCIONAL NA MICRORREDE CA

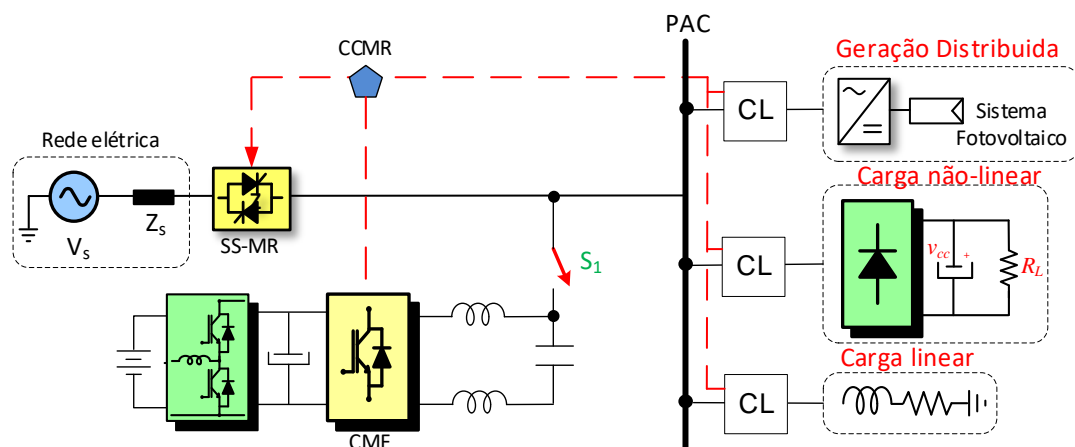
Esta seção apresenta o projeto para o desenvolvimento de um conversor multifuncional, assim como seus modos de operação, controle e dimensionamento do filtro LC de saída do VSI.

O conversor multifuncional pode desempenhar as funções de suporte à rede e de formador de rede, definidas na seção três deste trabalho. Neste projeto é usado o modelo de uma microrrede CA com controle do tipo mestre-escravo, formada por cargas lineares e não-lineares e uma MF, o que permite avaliar as múltiplas funções do conversor proposto.

4.1 O Conversor Multifuncional Proposto

Em microrredes, é possível encontrar um conversor denominado de *utility interface*, que provê as funcionalidades de suporte à rede e formador de rede, e este trabalho se fundamenta nessa configuração. Esse conversor é conectado em paralelo com a microrrede em todos os seus modos de operação. No modo conectado à rede este conversor opera como um filtro ativo paralelo, fazendo compensação de harmônicas e de reativos. Por outro lado, no modo ilhado, o conversor é responsável por criar uma referência de tensão e frequência para a microrrede. Outra função desse conversor é prover uma transição suave entre o modo conectado para ilhado e vice-versa (AZEVEDO, 2013; ZHANG; CHEN, 2014; TENTI; CALDOGNETTO; BUSO, 2014). A Figura 15 ilustra a configuração do conversor multifuncional aplicada em uma microrrede.

Figura 15 – Microrrede com conversor multifuncional



Fonte: Produção do próprio autor.

Na Figura 15 a chave SS-MR permite fazer a transição do modo conectado para ilhado e vice-versa. Quando a microrrede precisa operar no modo ilhado, a chave SS-MR é aberta e para operação no modo conectado à rede, a chave SS-MR é fechada. As cargas agora são modeladas e acopladas ao PAC por meio de um CL, assim como o CCMR, como descrito na seção 2. O CMF conectado em paralelo com a microrrede, exerce as funções de suporte à rede quando conectado à rede elétrica ou formador de rede, quando a microrrede precisa operar no modo ilhado. Para habilitar o fluxo bidirecional no conversor é adicionado no barramento CC do inversor um conversor *buck-boost* e banco de baterias (SILVA, 2011).

As funcionalidades do conversor proposto com funções específicas são:

(i) conversor formador de rede: (a) referência de tensão e frequência para os conversores supridores e cargas elétricas na microrrede no modo ilhado; (b) transição suave entre o modo conectado e ilhado e vice-versa;

(ii) conversor de suporte à rede: (a) operação como filtro ativo em paralelo; (b) regulação de tensão; (c) correção do fator de potência (potência reativa e de harmônicos de corrente);

4.2 Modos de Operação do Conversor Multifuncional

Como descrito na seção anterior, o sistema possui chaves que auxiliam o modo de operação do conversor. Com isso, dependendo da configuração das chaves, o conversor multifuncional opera em quatro modos. O Quadro 1 especifica as opções de chaveamento e o modo com o qual o conversor trabalha.

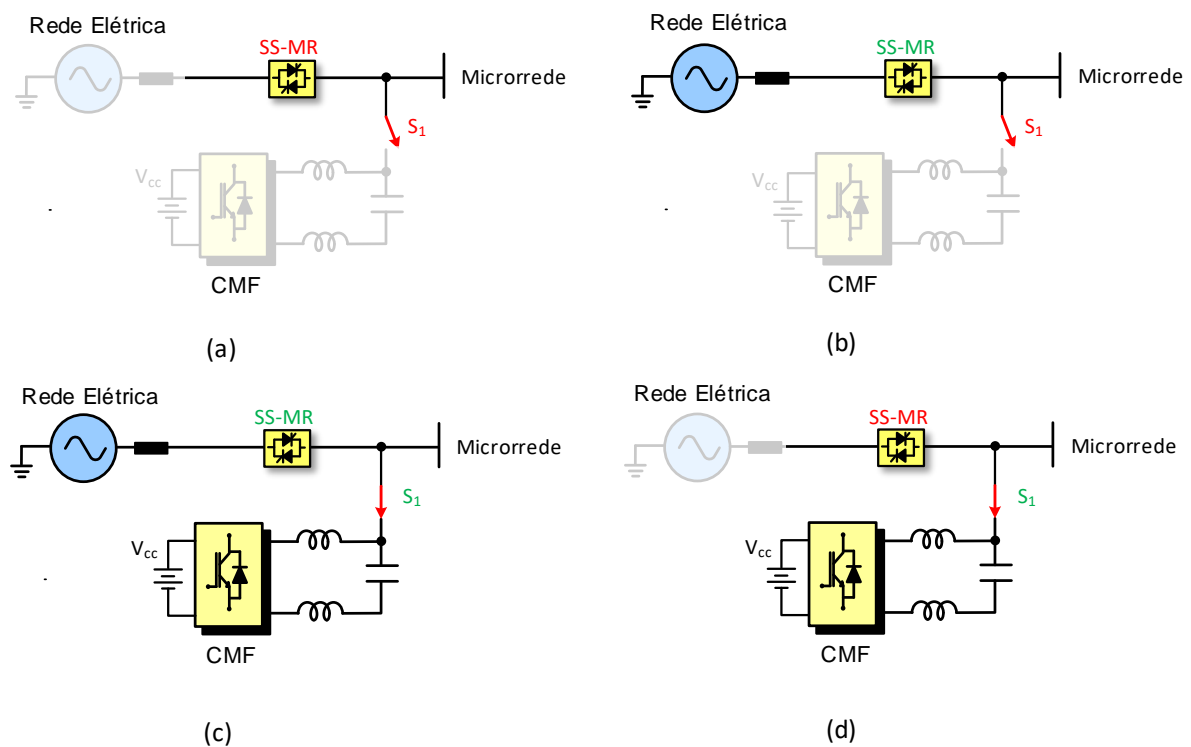
Quadro 1 – Modos de operação do conversor proposto

Modo	SS-MR	S₁
I	0	0
II	1	0
III	1	1
IV	0	1

Fonte: Produção do próprio autor.

O estado “1” representa a chave fechada, enquanto o estado “0” a chave aberta. Os modos de operação em regime permanente são ilustrados na Figura 16.

Figura 16 – Modos de operação do conversor multifuncional: (a) modo I; (b) modo II; (c) modo III; (d) modo IV



Fonte: Produção do próprio autor.

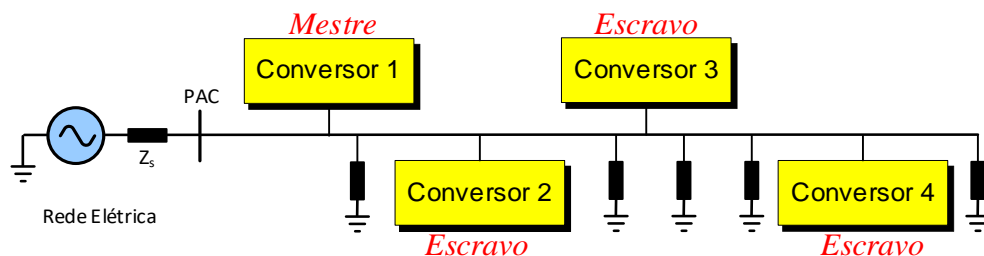
- Modo I: Microrrede desabilitada do sistema, portanto, a chave SS-MR encontra-se aberta e o conversor não conectado à rede, como ilustrado na Figura 16(a);
- Modo II: O conversor multifuncional está desativado, porém o PAC da microrrede é suprido pela rede elétrica. A chave SS-MR está fechada e chave S_1 aberta, como mostrado na Figura 16(b);
- Modo III: O conversor multifuncional é conectado em paralelo com a rede elétrica e as chaves SS-MR e S_1 são fechadas como ilustrado na Figura 16(c), com isso o CMF faz papel de suporte à rede, provendo compensação harmônica e correção do fator de potência;

- Modo IV: O conversor opera no modo ilhado como um formador de rede, conforme mostrado na Figura 16(d).

4.3 Controle Mestre-Escravo

Na técnica de controle mestre-escravo, ilustrada na Figura 17, o conversor de potência de uma microrrede precisa de uma estratégia de controle do tipo formador de rede. Perceba que o conversor de potência 1 é escolhido como mestre e os outros inversores operam como escravos, classificados como seguidores de rede.

Figura 17 – Estrutura de controle mestre-escravo



Fonte: Produção do próprio autor.

Nesta estratégia, com a microrrede operando no modo ilhado, ou seja, desconectada da rede principal, pelo menos um conversor exerce o controle de tensão. O conversor mestre desempenha este papel, operando de forma a controlar a tensão do barramento de carga dentro de uma amplitude e frequência de tensão desejada, estabelecendo dessa forma a tensão nominal da microrrede. Esta tensão é comparada com a tensão real no ponto de acoplamento, ou seja, a tensão real da planta.

O conversor mestre também impõe a potência desejada que, por sua vez, determinará a corrente desejada de cada conversor escravo. Esta corrente é comparada com a corrente real do respectivo conversor escravo. A diferença entre elas é processada pelo controle de corrente. Assim, este sinal de controle resultante atua como uma referência de tensão para o algoritmo do conversor escravo.

Quando a microrrede estiver conectada à rede, o modo de controle de corrente, por sua vez, é quem comanda o conversor mestre. O CCMR é responsável por garantir essa mudança na

operação do formador de rede entre o modo PQ e V-f, exigindo a presença de um canal de comunicação. Também é importante destacar que a transição da microrrede do modo conectado para o modo ilhado ocorre com o mestre em paralelo com a rede elétrica (PARHIZI; LOTFI, H; KHODAEI, 2015; WANG; GUERRERO; BLAABJERG, 2012).

4.4 Projeto do Filtro LC

O filtro de saída dos VSIs é importante para que se reduza o *ripple* do chaveamento, além de propiciar o acoplamento do conversor com a rede elétrica. Quando o conversor multifuncional precisa operar como uma fonte de corrente, a corrente no indutor é controlada. Já na operação como fonte de tensão a corrente no indutor e a tensão no capacitor são controladas (ROCABERT; LUNA; BLAABJERG, 2012).

É proposto por Antunes (2018) um projeto de filtro LC fundamentado na operação híbrida do inversor, ou seja, tanto como fonte de corrente quanto fonte de tensão controlada. É usual que os inversores com fonte de tensão controlada tenham a corrente no ramo capacitivo limitada entre 10% e 15% da capacidade nominal do VSI (SILVA, 2011). Já para as fontes de corrente controladas o indutor é projetado baseado no critério de *ripple*, com valor máximo entre 10% a 25% da corrente nominal (WANG; GUERRERO; BLAABJERG, 2012).

A capacitância do filtro é adotada como sendo igual a 7,5% da potência nominal do conversor monofásico conforme equação (1). Para o cálculo da indutância, é adotado um *ripple* de corrente igual a 30% como definida na equação (2) (TEODORESCU; LISERRE; RODRIGUEZ, 2011). Por último, é possível calcular a frequência de corte (f_c) do filtro LC, usando uma separação de uma década da frequência de chaveamento conforme equação (3) (SILVA, 2011).

$$C = \frac{kS_n}{2\pi f V_f^2} \quad (1)$$

$$L = \frac{V_{cc}}{6f_{sw}\Delta_{iL}} \quad (2)$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3)$$

Onde:

k – percentual de reativos do filtro LC;

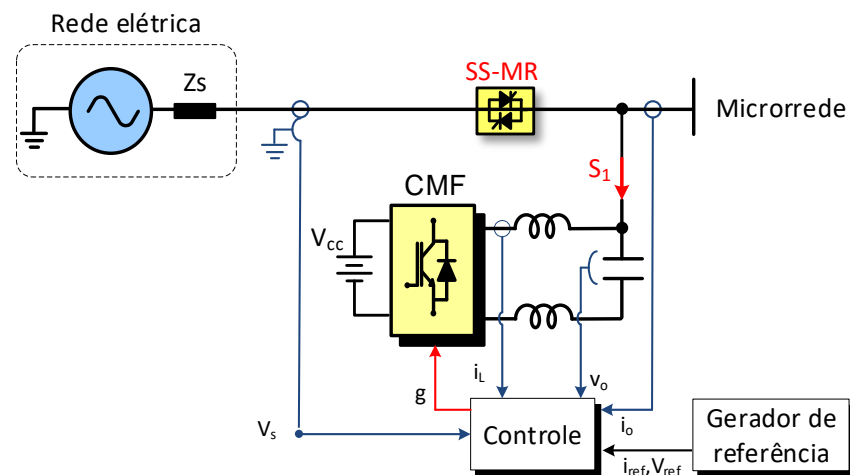
S_n - potência do VSI monofásico (kVA);

f – frequência elétrica fundamental (Hz);
 V_f – tensão de fase (V);
 V_{CC} – tensão no barramento CC do inversor (V);
 f_{sw} – frequência de chaveamento (Hz);
 Δi_L – máximo *ripple* de corrente (A)

4.5 Controle do Conversor Multifuncional

A principal função do controle do conversor multifuncional é garantir a operação da microrrede, bem como prover uma transição suave entre os seus modos de operação. A Figura 18 mostra um diagrama por fase com todas as grandezas elétrica medidas para o controle do conversor. Também é possível observar o gerador de referência, que de acordo como o modo de operação do conversor cria uma tensão ou corrente de referência.

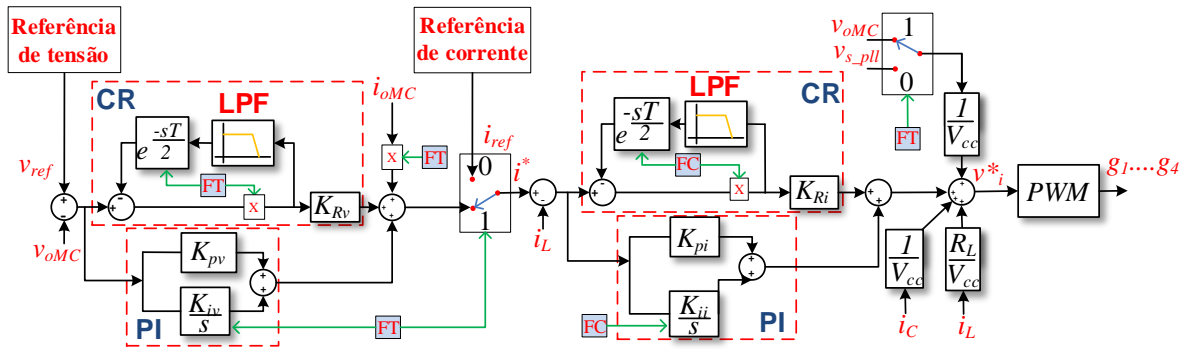
Figura 18 – Diagrama de conexões e sensores do conversor multifuncional



Fonte: Produção do próprio autor.

A estrutura de controle implementada permite a operação do conversor como FC controlada ou FT. A operação é selecionada por meio das variáveis “FT” e “FC” ilustradas na Figura 19. O controle é composto pela associação paralela do controle repetitivo (CR) para harmônicas ímpares e um controlador PI (proporcional-integral) para a malha de tensão e malha de corrente (RYAN; BRUMSICKLE; LORENZ, 1997).

Figura 19 – Esquemático do controle do conversor multifuncional proposto

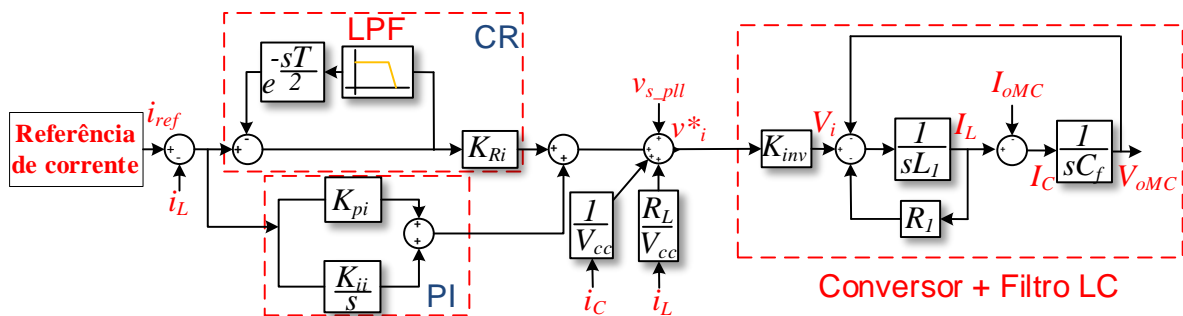


Fonte: Produção do próprio autor.

4.5.1 Controle da Malha de Corrente

Para o projeto da malha de corrente é necessário desativar a malha de tensão, ou seja, fazendo as variáveis “ $FT=0$ ” e “ $FC=1$ ”. A malha de corrente é formada pela associação do PI e do CR para harmônicas ímpares, de modo que seja possível rastrear uma referência periódica. Para melhorar a resposta dinâmica do controle de corrente é feita realimentação da tensão da rede (v_{s_pll}) e cancelamento da resistência equivalente da indutância do filtro LC (R_{iL}). O diagrama da Figura 20 demonstra os principais parâmetros do controle.

Figura 20 – Diagrama de controle para operação como uma fonte de corrente controlada



Fonte: Produção do próprio autor.

Os parâmetros do controlador são orientados por especificações relativas ao circuito em malha fechada, analisando sua velocidade de resposta ou, equivalentemente, o erro em relação ao sinal de referência (BUSO; MATTAVELLI, 2015). Para o controlador de corrente, a frequência de crossover é igual a cerca de um décimo da frequência de comutação, e essa frequência é

alcançada com, pelo menos, uma margem de fase de 60°. Portanto, é necessário determinar os parâmetros K_{pi} e K_{ii} para garantir a conformidade com esses requisitos.

Para o projeto do PI da malha de corrente é adotada uma frequência de crossover igual 1200 Hz, considerando uma frequência de chaveamento igual a 12 kHz e uma margem de fase de 85°. A função de transferência de malha aberta é definida na equação (4).

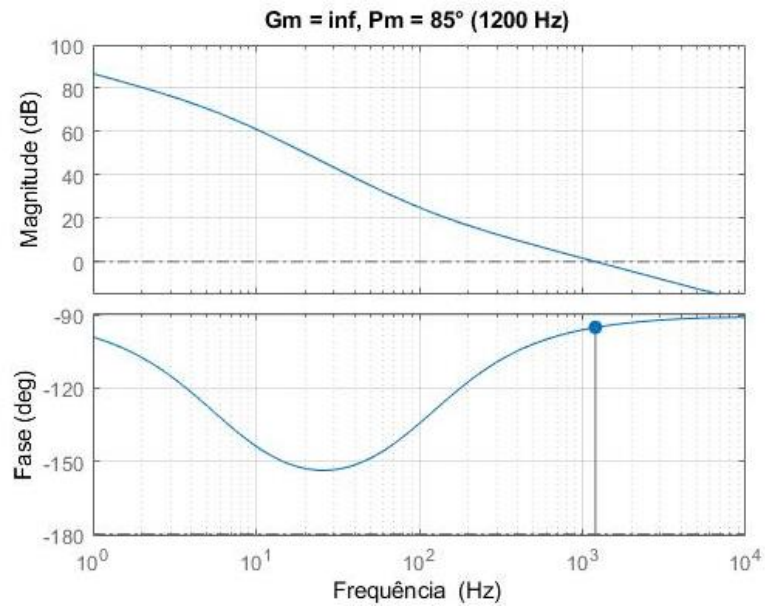
$$FTMA = \left(K_{pi} + \frac{K_{ii}}{s} \right) \left(\frac{1}{sL_1 + R_1} \right) (K_{inv}) \quad (4)$$

Os ganhos são calculados obedecendo os critérios de margem de fase e margem de ganho. A margem de fase é o atraso de fase adicional na frequência de cruzamento do ganho, necessário para levar o sistema ao limiar de instabilidade. A frequência de cruzamento ocorre quando o $|G(j\omega)|$ é unitário e a margem de fase é calculada com a soma de 180° mais o ângulo de fase φ da função de $G(j\omega)$ (BUSO; MATTAVELLI, 2015).

A equação (5) demonstra a função de transferência do sistema de malha fechada considerando o ganho do inversor igual a um. O projeto conduziu aos ganhos $K_{pi} = 0,4338 \Omega$ e $K_{ii} = 302,6392 \Omega s^{-1}$. As respostas em frequência da função de transferência de malha aberta e malha fechada de corrente são apresentadas na Figura 21 e Figura 22 respectivamente.

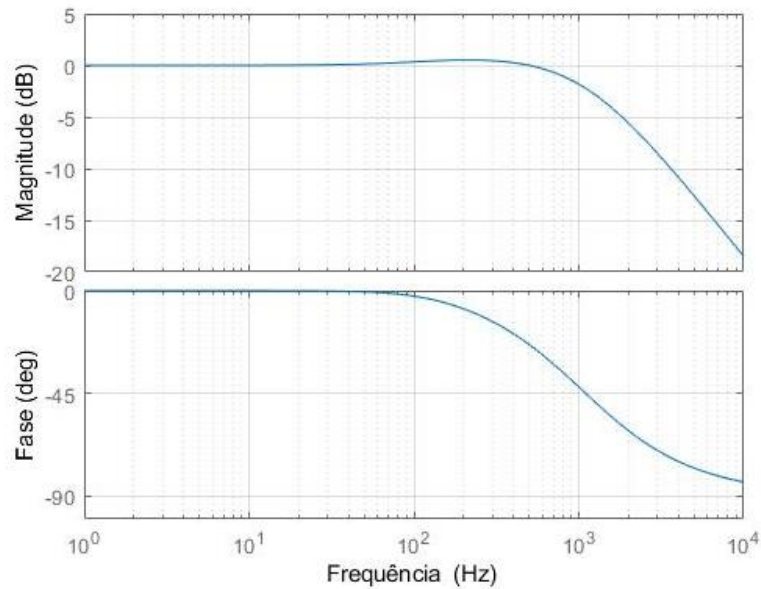
$$FTMF = \frac{i_{ref}(s)}{i_L(s)} = \frac{sK_{pi} + K_{ii}}{s^2L_1 + sR_1 + sK_{pi} + K_{ii}} \quad (5)$$

Figura 21 – Diagrama de Bode da malha de corrente da função de transferência de malha aberta



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 22 – Diagrama de Bode da malha de corrente da função de transferência de malha fechada



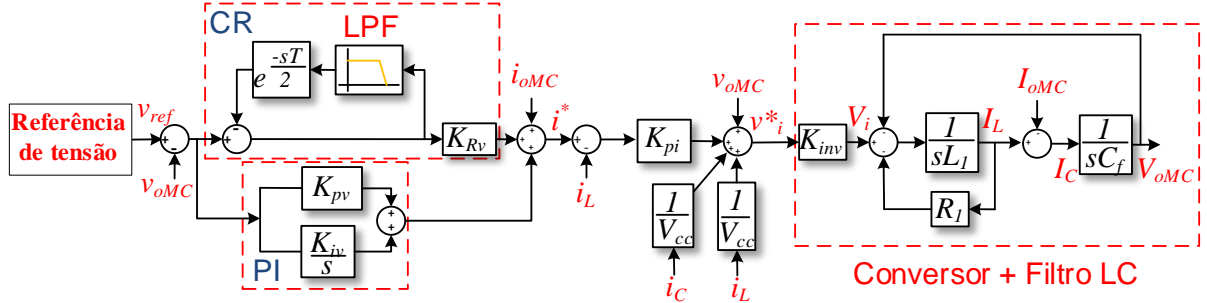
Fonte: Produção do próprio autor.

4.5.2 Controle Malha de Tensão

O controle do modo de tensão é habilitado fazendo as variáveis “ $FT=1$ ” e “ $FC=0$ ” no diagrama esquemático da Figura 23, de forma que o esquema de controle passa a ser o da Figura 4.9, que é composto pela associação paralela do controle repetitivo (CR) para harmônicas ímpares e o

controlador PI (proporcional-integral) para a malha de tensão em cascata com um controlador proporcional para a malha de corrente (ZHOU; LOW; WANG, 2006).

Figura 23 – Diagrama de controle para operação como uma fonte de tensão controlada



Fonte: Produção do próprio autor.

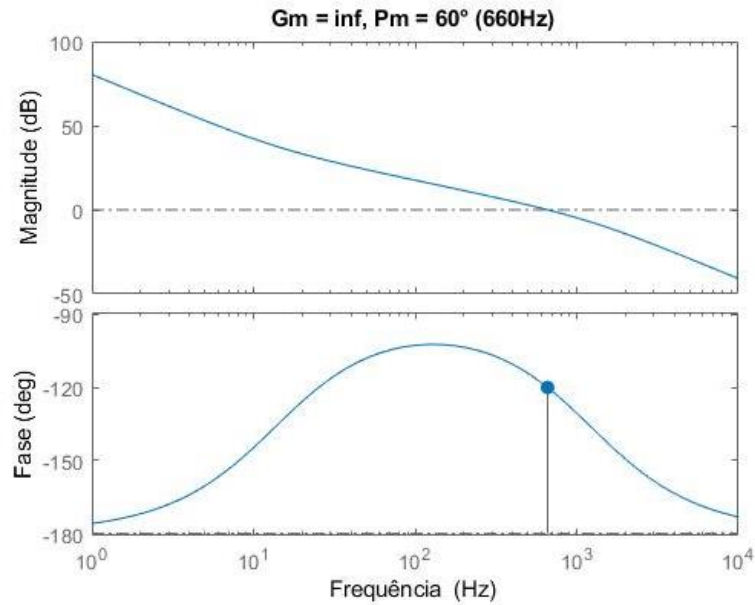
Considerando que a malha de corrente é muito mais rápida que a de tensão ($i^*_L = i_L$), é possível obter a função de transferência de malha aberta da tensão, conforme equação (6). Também são utilizadas algumas ações de *feedforward* que incluem realimentação da tensão de saída (V_{oMC}), corrente de saída (i_{oMC}) e cancelamento da resistência equivalente da indutância do filtro LC (R_1) (SILVA, 2011). A FTMF de tensão pode ser calculada a partir da equação (7).

$$FTMA = \left(K_{pv} + \frac{K_{iv}}{s} \right) \left(\frac{1}{sC_f} \right) (K_{pi})(K_{inv}) \quad (6)$$

$$FTMF = \frac{V_{ref}(s)}{v_{oMC}(s)} = \frac{sK_{pv}K_{pi} + K_{iv}K_{pi}}{s^2C + sK_{pv}K_{pi} + K_{iv}K_{pi}} \quad (7)$$

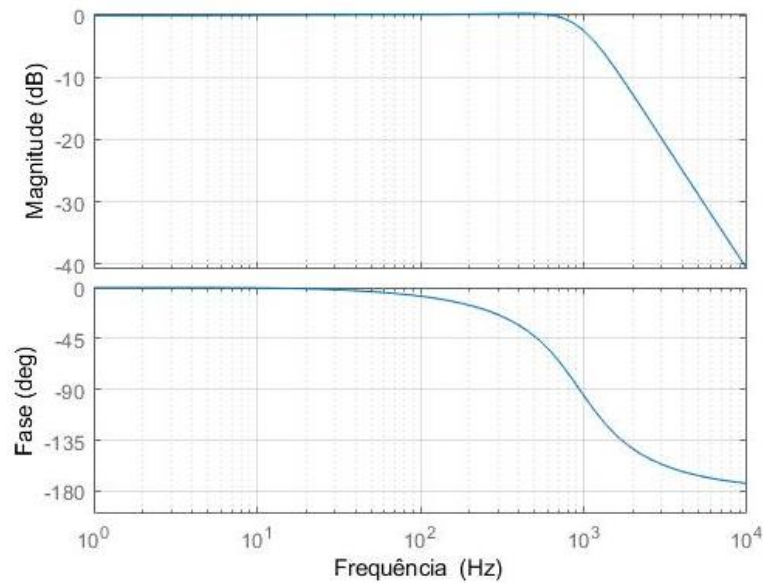
Adotando uma frequência de crossover de 660 Hz e uma margem de fase de 60° para a malha de tensão e 1200 Hz com margem de fase de 85° para a corrente, é possível projetar a malha de tensão pelo critério de margem de fase e de margem de ganho. Os ganhos obtidos com o projeto da malha de tensão são $K_{pi} = 0,4338 \Omega$, $K_{pv} = 1,0236 \Omega^{-1}$ e $K_{iv} = 89,4753 \Omega^{-1}s^{-1}$, adotando um sensor de tensão igual a $\frac{1}{220}$ (VV^{-1}). As respostas em frequência da função de transferência de malha aberta e malha fechada de corrente são apresentadas na Figura 24 e Figura 25, respectivamente.

Figura 24 – Diagrama de Bode da malha de tensão da função de transferência de malha aberta



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 25 – Diagrama de Bode da malha de tensão da função de transferência de malha fechada



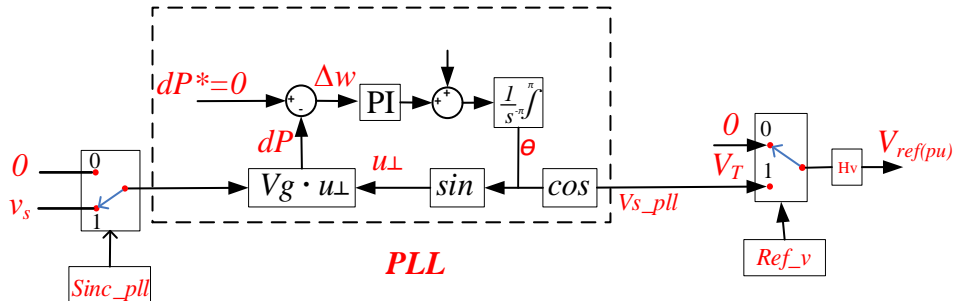
Fonte: Produção do próprio autor.

4.5.3 Referência de Tensão

A Figura 26 mostra o bloco de referência de tensão definido nas Figuras 20 e 23, que propicia a operação como uma fonte de tensão controlada. Quando a rede elétrica principal está presente,

esse inversor fica aguardando o momento exato para que sua entrada em operação seja garantida sem transitório de tensão e frequência (ANTUNES, 2018).

Figura 26 – Bloco para referência de tensão utilizado no conversor multifuncional



Fonte: Produção do próprio autor.

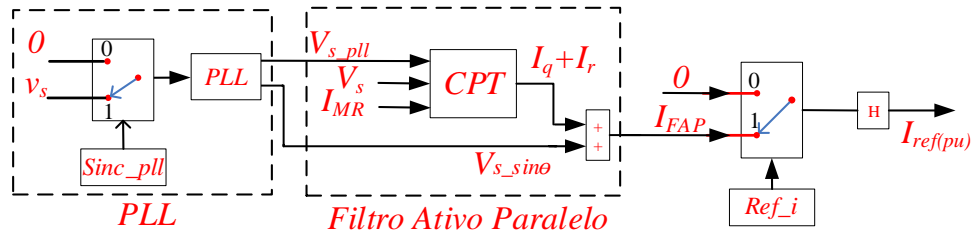
Quando a variável Ref_v for igual a zero, não é gerada nenhuma referência de tensão, e o conversor opera em *standby*. Já para a variável Ref_v no valor igual a um, o conversor multifuncional opera no modo IV. Para a transição do modo conectado à rede para o modo ilhado, o PLL é desconectado da medição da rede, fazendo a variável $Sinc_pll$ igual a zero.

Quando a variável $Sinc_pll$ for igual a um, significa que a PLL está sincronizada com a rede elétrica, gerando uma tensão de referência (V_{s_pll}) e frequência de 60 Hz. O sinal de referência é subtraído da tensão da rede medida (V_s) e é gerada uma referência que deve ser produzida em série com a rede elétrica.

4.5.4 Referência de Corrente

A Figura 27 define o bloco que gera a referência de corrente ilustrado nas Figuras 20 e 21, que é responsável por operar o conversor multifuncional como uma fonte de corrente controlada no modo III.

Figura 27 – Bloco para referência de corrente utilizado no conversor multifuncional



Fonte: Produção do próprio autor.

Quando a variável Ref_i for igual a zero, nenhuma referência de corrente é gerada. Caso o conversor necessite mudar para o modo III, ao fim do término da transição do modo ilhado para conectado, é necessário fazer a variável Ref_i igual a um, assim, o CMF opera como suporte à rede. Para gerar a corrente de referência é utilizada a teoria da potência conservativa (CPT). A CPT decompõe as correntes de fase em parcelas ativas, reativas e residuais. Assume-se que a operação é periódica, assim para os cálculos de valores médios podem ser usados um ou mais ciclos do período da frequência fundamental (PAREDES; BRANDÃO; TERRAZAS, 2011).

A corrente ativa I_a é definida como a corrente mínima necessária para transportar potência ativa por meio de uma rede e é expressa pela equação (8).

$$I_a = \frac{\langle v, i \rangle}{\|v\|^2} v = \frac{P}{V^2} v = G_e v \quad (8)$$

Onde G_e é a condutância equivalente e V é o valor eficaz da tensão. A corrente ativa transporta toda a potência ativa e zero de energia reativa. O produto interno entre os vetores da corrente mínima e da tensão eficaz é determinado pela equação (9). Já a corrente ativa é obtida com a equação (10), o que resulta em uma potência ativa nula, representada na equação (11).

$$I_a = \langle v, i_a \rangle = G_e \langle v, v \rangle = G_e \|v\|^2 = G_e V^2 = P \quad (9)$$

$$\|i_h\| = i_a = \frac{P}{V} \quad (10)$$

$$W_{ra} = \langle \hat{v}, i_a \rangle = G_e \langle \hat{v}, v \rangle = 0 \quad (11)$$

Um segundo termo presente, é a corrente reativa i_q apresentada na equação (12), que é definida como a corrente mínima necessária para transportar energia reativa por meio de uma rede, onde \hat{V} é o valor eficaz da integral imparcial da tensão.

$$I_q = \frac{\langle \hat{v}, i \rangle}{\|\hat{v}\|^2} \hat{v} = \frac{Wr}{\hat{v}^2} \hat{v} \quad (12)$$

O produto interno entre a corrente reativa mínima e a tensão eficaz produz potência reativa nula, conforme demonstrado nas equações (13) a (17).

$$W_{qL} = \langle \hat{v}, i_q \rangle = B_e \langle \hat{v}, \hat{v} \rangle = B_e \|\hat{v}\|^2 = B_e \hat{v}^2 = W_q \quad (13)$$

$$W_{qC} = \langle \hat{v}, i_q \rangle = C_e \frac{V^2}{\hat{v}^2} \langle \hat{v}, \hat{v} \rangle = C_e \frac{V^2}{\hat{v}^2} \|\hat{v}\|^2 = C_e V^2 = |W_q| \quad (14)$$

$$\|i_q\| = i_q = \frac{W_r}{\hat{v}} \quad (15)$$

$$P_L = \langle v, i_q \rangle = B_e \langle v, \hat{v} \rangle = 0 \quad (16)$$

$$P_C = \langle v, i_q \rangle = C_e \frac{V^2}{\hat{v}^2} \langle v, \hat{v} \rangle = 0 \quad (17)$$

Onde B_e e C_e são o inverso da indutância e da capacitância respectivamente e I_q é o valor eficaz da corrente reativa. Note que a corrente reativa transporta toda a energia reativa e zero de potência ativa. Como foi demonstrado, tanto a impedância equivalente quanto à capacitância equivalente não produz potência ativa.

A última corrente decomposta é a residual, representada por i_v , no qual não transporta potência ativa nem energia reativa, expressa pela equação (18). De fato, os produtos internos resultam em zero, como demonstrado nas equações (19) e (20).

$$i_v = i - i_a - i_q \quad (18)$$

$$P_v = \langle v, i_v \rangle = \langle v, i - i_a - i_q \rangle = \langle v, i \rangle - \langle v, i_a \rangle - \langle v, i_q \rangle = P - P_a - P_L = 0 \quad (19)$$

$$W_{qv} = \langle \hat{v}, i_v \rangle = \langle \hat{v}, i - i_a - i_q \rangle = \langle \hat{v}, i \rangle - \langle \hat{v}, i_a \rangle - \langle \hat{v}, i_q \rangle = W_q - W_{qa} - W_{qL} = 0 \quad (20)$$

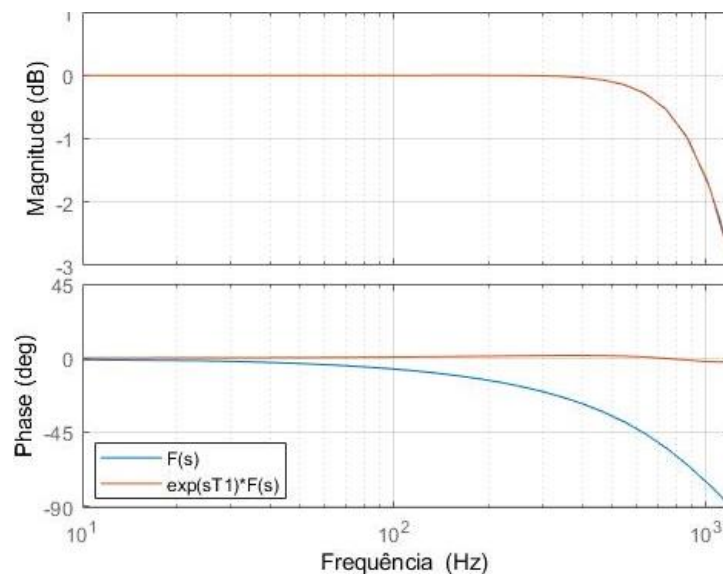
4.5.5 Projeto do Controlador Repetitivo

Para o projeto do CR é necessário definir o ganho K_r e o filtro passa-baixa que irá limitar a faixa de passagem da malha de tensão, garantindo a estabilidade do sistema. O filtro é dimensionado para obter uma frequência de corte (w_c) inferior a frequência de corte da malha de corrente (w_{ci}). A função de transferência do filtro escolhido é apresentada na equação (21).

$$F(s) = \frac{1}{\frac{s^2}{W_c^2} + 2\varepsilon\frac{s}{W_c} + 1} \quad (21)$$

Como definida nas seções anteriores, a frequência de corte da malha de corrente deve ser igual a 1200 Hz. Desse modo, um filtro $F(s)$ com frequência de corte igual 900 Hz atende os requisitos de projeto. Na Figura 28 é apresentada a resposta em frequência do filtro $F(s)$, sem e com a adição do avanço e^{sT1} , considerando ε igual a 0,7.

Figura 28 – Resposta em frequência do filtro



Fonte: Produção do próprio autor.

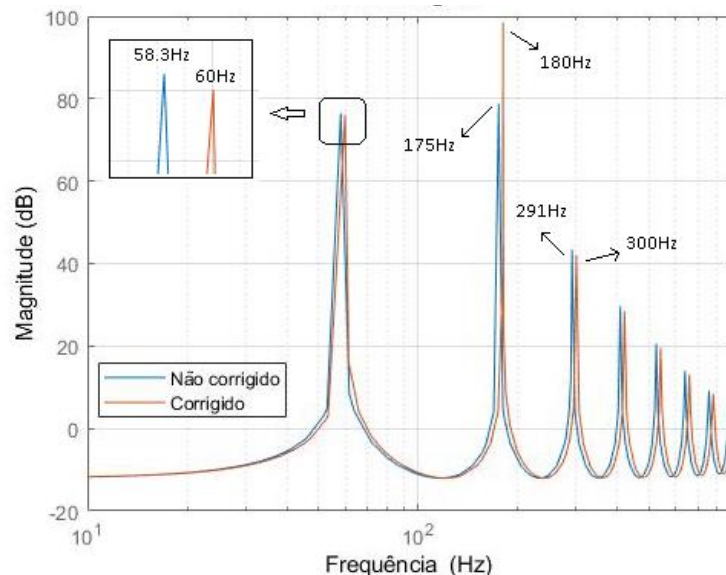
A partir da resposta em frequência de $F(s)$ é possível notar que com a adição do avanço não há alteração na resposta do seu módulo. Porém, para a banda de passagem analisada igual a frequência de corte do filtro, o aumento do avanço garante a manutenção da fase nula. Com $T1$ igual a $(1/30)$ do período da frequência fundamental a condição é assegurada. Porém, quando o CR é associado ao PI ocorre novamente um deslocamento dos seus polos, pois esse controlador

possui uma resposta que provê o avanço de fase. Dessa maneira, é necessário esboçar a FTMA definida na equação (22) e definir o avanço de fase (T_{comp}) que garante a realocação dos polos.

$$F(s) = \left(Kpv + \frac{Kiv}{s} + \frac{Kr}{1+e^{-\frac{s(T-T_{comp})}{2}}} \right) \left(\frac{Kpi}{sL+Kpi} \right) \left(\frac{1}{sC} \right) \quad (22)$$

Na Figura 29 tem-se a resposta em frequência da FTMA sem e com a adição do avanço de fase. Com a adição do avanço de fase T_{comp} igual a $(1/33)$ do período da frequência fundamental, os polos do CR são realocados, e voltam a ser múltiplos inteiros da fundamental.

Figura 29 – Resposta em frequência da FTMA



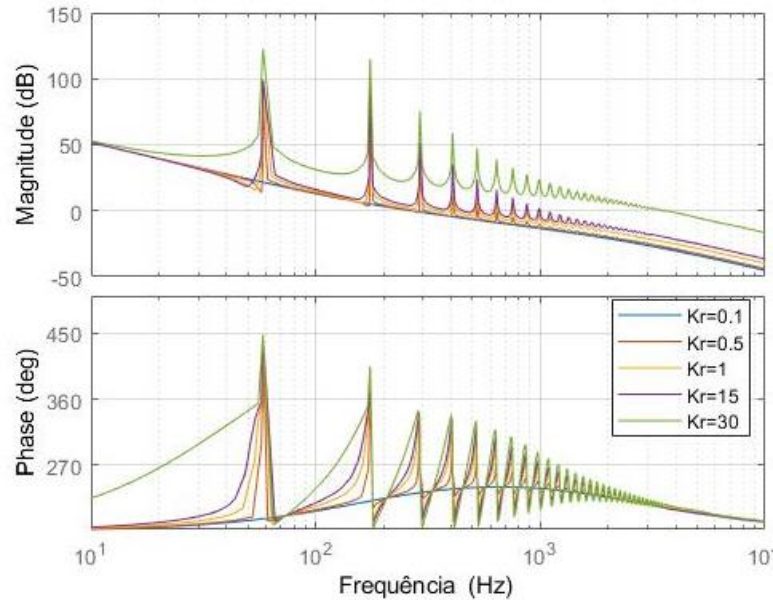
Fonte: Produção do próprio autor.

Com os parâmetros do filtro de saída e com os ganhos dos controladores de tensão e corrente obtidos, é possível definir o ganho K_r , que garanta uma rápida resposta transitória. O aumento do ganho K_r causa o incremento da faixa de passagem da malha de tensão e deve ser avaliado em conjunto com a malha de corrente (SILVA, 2011).

Segundo Silva (2011), para encontrar o valor do K_r , deve ser esboçada a FTMA do conversor formador de rede e utilizar como parâmetro balizador a margem de fase. Isso se ao fato de que um elevado K_r pode fazer com que a malha de tensão produza uma referência que a malha de corrente não possa sintetizar. O procedimento para encontrar os parâmetros do CR da malha de

corrente é análogo ao processo da malha de tensão. A Figura 30 ilustra a FTMA para diversos valores de K_r .

Figura 30 – Resposta em frequência da função de transferência de malha aberta para diferentes valores de ganhos do controlador repetitivo



Fonte: Produção do próprio autor.

4.6 Comentários Sobre o Conversor Multifuncional na Microrrede CA

Nesta seção foi detalhado o conversor multifuncional, seu desenvolvimento quanto ao controle e seus modos de operação. Foi proposto um conversor multifuncional, para o caso monofásico e desenvolvido o controle do conversor multifuncional para o modo de operação como fonte de tensão e fonte de corrente controlada de acordo com o modo de operação desejado. Foram apresentados todos os diagramas do conversor, assim como suas simbologias e expressões matemáticas relevantes para o projeto. Na próxima seção serão apresentados os resultados de simulações do conversor proposto com aplicação em uma microrrede, por meio de simulação em *Matlab/Simulink*.

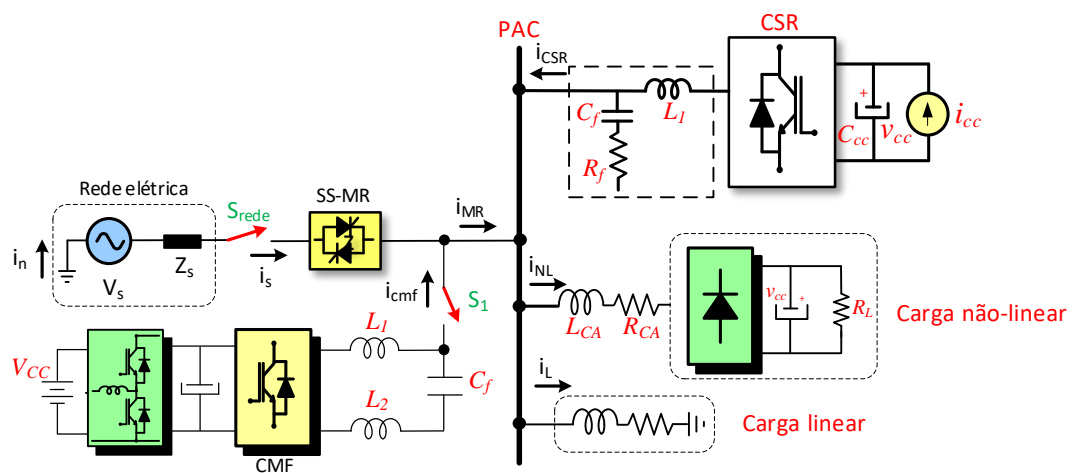
5 ANÁLISE E OPERAÇÃO DO CONVERSOR MULTIFUNCIONAL

A partir de toda a metodologia apresentada na seção 4, é simulado o conversor multifuncional no *software Matlab/Simulink*. São apresentados os principais resultados de simulação do conversor aplicado em uma microrrede monofásica com arquitetura de controle centralizada. Dentre os diversos cenários simulados é destacada a operação multifuncional como formador de rede e suporte à rede, em conjunto com as transições entre modos de operação.

5.1 Microrrede com Conversor Multifuncional Monofásico

A microrrede monofásica utilizada como modelo para os estudos deste trabalho é apresentada na Figura 31. Segundo o padrão IEEE Std. 1547.4 (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, 2011) a configuração é do tipo ilha secundária, com uma fonte de geração distribuída, consumidores e rede de distribuição de baixa tensão (BT).

Figura 31 – Configuração da microrrede monofásica em estudo



Fonte: Produção do próprio autor.

A fonte de geração distribuída da microrrede é formada por um conversor supridor de rede (CSR), com capacidade de suprir parcialmente/totalmente as cargas elétricas, dependendo do instante de operação do sistema elétrico. As cargas da microrrede são do tipo linear e não-linear. A carga linear possui impedância constante, do tipo RL. A carga não-linear é formada por um retificador com diodos em ponte completa, com capacitor e resistor no lado CC (ANTUNES, 2018).

Todo o modelo é desenvolvido na plataforma *Matlab/Simulink*. O Quadro 2 apresenta os principais parâmetros da microrrede e do CMF. A capacidade nominal do VSI para o conversor multifuncional é escolhida para o caso mais crítico, que se refere a operação ilhada da rede elétrica com o supridor de rede desativado e com carga elétrica nominal.

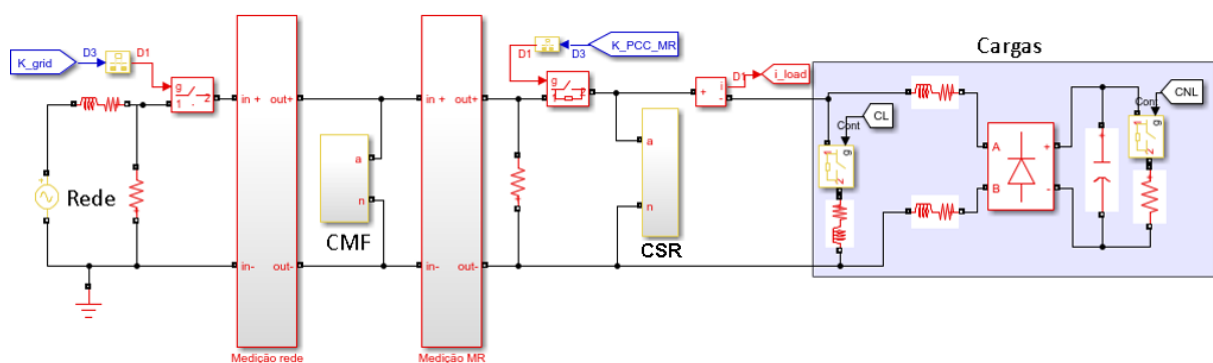
Quadro 2 – Parâmetros para simulação do conversor multifuncional

Grandezas	Valor
Conversor multifuncional	25 kVA, $L_1=L_2=42.784 \mu\text{H}$, $C_f=411 \mu\text{F}$
Frequência de chaveamento	12.000 Hz
Tensão no barramento CC	311 V
Rede elétrica	127 V, 60 Hz
Conversor supridor de rede	25 kVA, $L_1=170 \mu\text{H}$, $R_1=64 \text{ m}\Omega$, $R_f=50 \text{ m}\Omega$, $C_f=100 \mu\text{F}$
Carga linear	13 kVA, $f_p = 0,8$ atrasado, $R_{\text{load}}=0.968 \Omega$, $L_{\text{load}}=1.925 \text{ mH}$
Carga não-linear	10 kW, $C_{\text{CC}}=30 \text{ mF}$, $R_L=3\Omega$, $R_{\text{CA}}=64 \text{ m}\Omega$, $L_{\text{CA}}=30 \mu\text{H}$

Fonte: Produção do próprio autor.

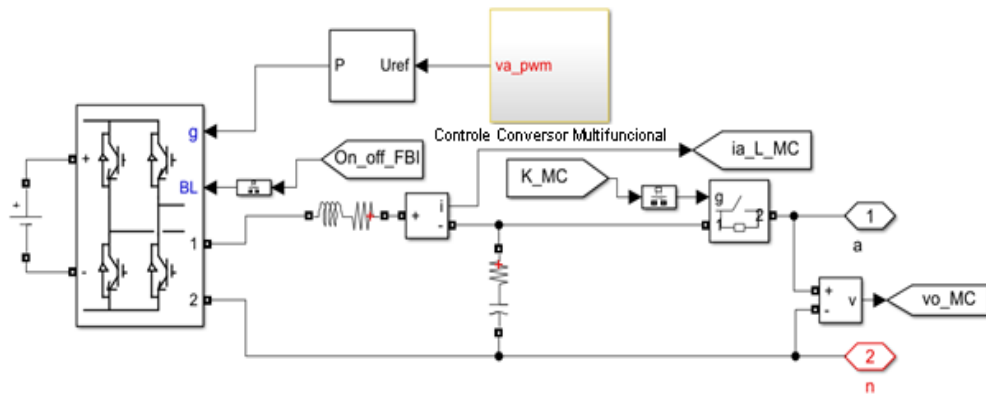
A seguir são apresentados os principais resultados com demonstração da operação do conversor multifuncional em seus modos e transições para diferentes cenários. A planta estudada na seção 2 da microrrede monofásica é apresentada como modelo computacional desenvolvido no *Simulink* na Figura 32, destacando a presença de um gerador distribuído (CSR). O bloco do CMF é apresentado na Figura 33.

Figura 32 – Modelo computacional do sistema completo do CMF



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 33 – Bloco do conversor multifuncional



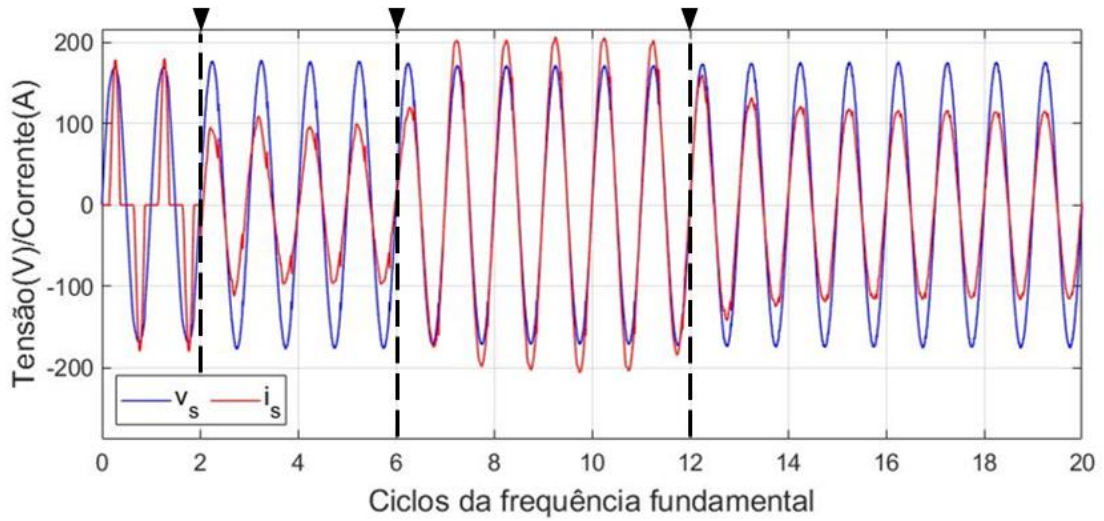
Fonte: Produção do próprio autor.

5.1.1 Cenário I - Filtro Ativo Paralelo

Neste primeiro cenário, o CMF atua provendo serviços de suporte à rede no modo III, como um filtro ativo paralelo, realizando compensação harmônica e correção do fator de potência. As principais formas de onda são apresentadas nas Figuras 34 e 35. A sequência de operação utilizada para simular é apresentada a seguir.

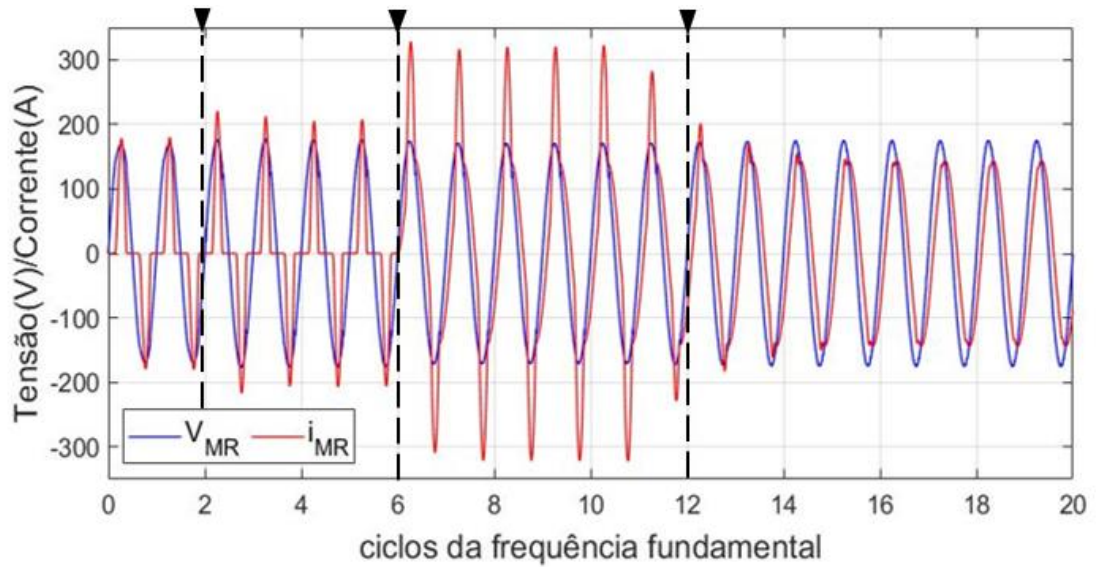
- $t = 0s$ - o PAC da microrrede é energizado pela rede elétrica e a carga não-linear é conectada, com o conversor multifuncional em *stand-by* no modo II;
- $t = (2/60)s$ - o conversor multifuncional passa a operar como um filtro ativo paralelo no modo III;
- $t = (06/60)s$ - a carga RL é conectada e a não-linear desconectada;
- $t = (12/60)s$ - a carga não-linear é reconectada na microrrede;
- $t = (20/60)s$ - fim da simulação.

Figura 34 – Resultados do cenário I com forma de onda da tensão (V_s) e corrente (I_s) na rede



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 35 – Resultados do cenário I com forma de onda da tensão (V_{MR}) e corrente (I_{MR}) na microrrede



Fonte: Produção do próprio autor.

Como resultado, é obtida a taxa de distorção harmônica (TDH), que revela a distorção presente em relação a uma forma de onda senoidal, ou seja, é a relação entre o conteúdo harmônico de uma onda e seu valor fundamental, e pode ser calculado a partir das equações (23) e (24).

$$TDH(\%) = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} F_n^2}{F_1^2}} \times 100 \quad (23)$$

onde:

$$Fn = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (24)$$

Os coeficientes a_n e b_n são as amplitudes em cosseno e seno respectivamente dos harmônicos de ordem n . Um outro resultado analisado é o fator de potência (fp) de uma carga, definido como a relação entre a potência ativa (P) e a potência aparente (S) consumida. Quando a tensão de alimentação é considerada senoidal pura, o fator de potência pode ser definido pela equação (25).

$$fp = \frac{\cos \emptyset}{\sqrt{1+TDH^2}} \quad (25)$$

Onde \emptyset é o ângulo de defasamento da componente fundamental de uma forma de onda periódica em relação a um seno ou cosseno de referência. Em circuitos lineares, esse cosseno é coincidente com o próprio fator de potência do sistema

O Quadro 3 apresenta os valores de TDH_v , TDH_i e fator de potência no PAC da microrrede como filtro ativo paralelo.

Quadro 3 – Comparação de distorção harmônica e fator de potência no cenário I

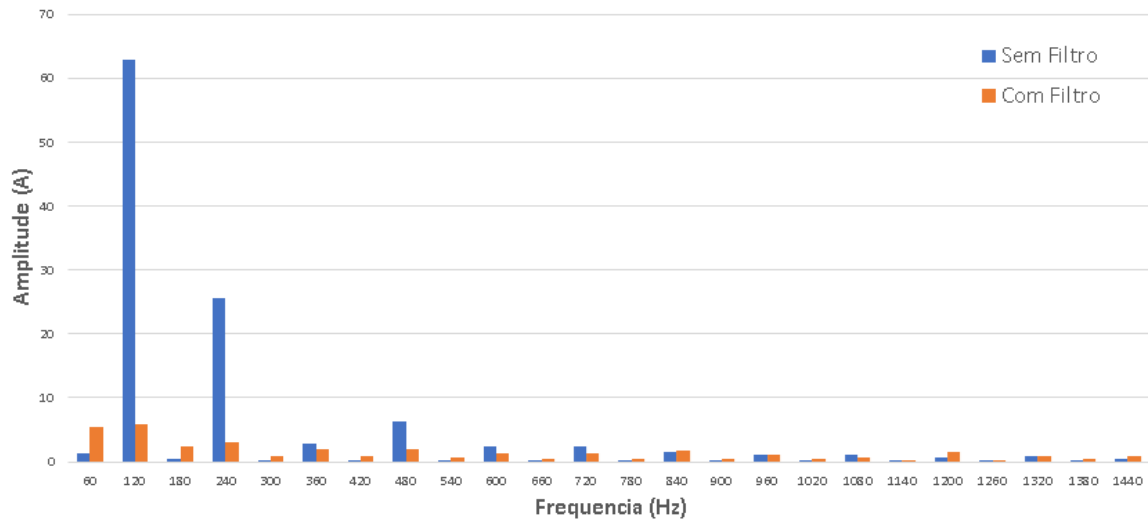
Intervalo (s)	$TDH_v (V_s)$	$TDH_i (i_s)$	$TDH_i (i_{MR})$	$fp (i_s)$
0 - (4/60)	3,18 %	79,98 %	79,98 %	0,773 atrasado
(4/60) - (10/60)	1,53 %	17,45 %	84,91 %	0,976 atrasado
(10/60) - (15/60)	1,35 %	2,51 %	35,32 %	0,996 atrasado
(15/60) - (24/60)	0,93 %	2,01 %	3,14 %	0,999 atrasado

Fonte: Produção do próprio autor.

Dos resultados das Figura 34 e Figura 35 é possível notar que inicialmente a rede elétrica alimenta a carga não-linear, e com um $TDH (i_s) = 79,98 \%$ e $TDH (V_s) = 3,18 \%$. A operação do filtro ativo no instante $t = (4/60)s$ faz com que a corrente na rede fique senoidal, com um $TDH (i_s) = 17,45 \%$ e $TDH (V_s) = 1,53 \%$. No instante $t=(10/60)s$, o filtro ativo supre a potência reativa da carga linear, mantendo o fator de potência igual a 0,996 atrasado.

Pode ser visto na Figura 36, a comparação das parcelas harmônicas de corrente da rede nos momentos sem o filtro ativo em azul e depois utilizando o filtro ativo em laranja. Nota-se que as parcelas harmônicas ímpares diminuem.

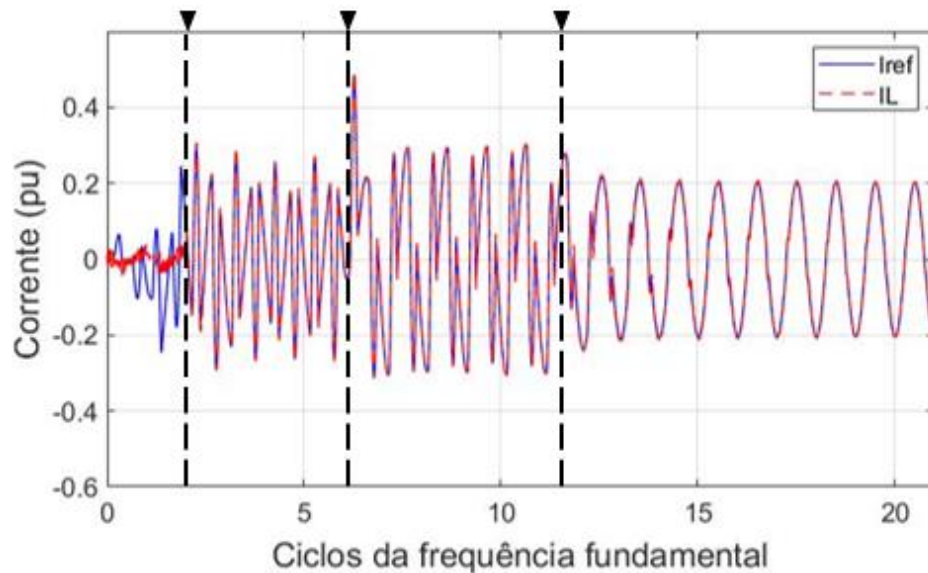
Figura 36 – Comparação do espectro da corrente na rede com filtro e sem filtro



Fonte: Produção do próprio autor.

Na Figura 37 é apresentada a resposta da malha de corrente do filtro ativo, sendo que até $t = (4/60)s$ o filtro não é inserido no sistema, por isso não ocorre aproximação da corrente pela referência e posteriormente tem-se a operação como compensador de harmônicos e reativos.

Figura 37 – Resultado da resposta da malha de corrente



Fonte: Produção do próprio autor.

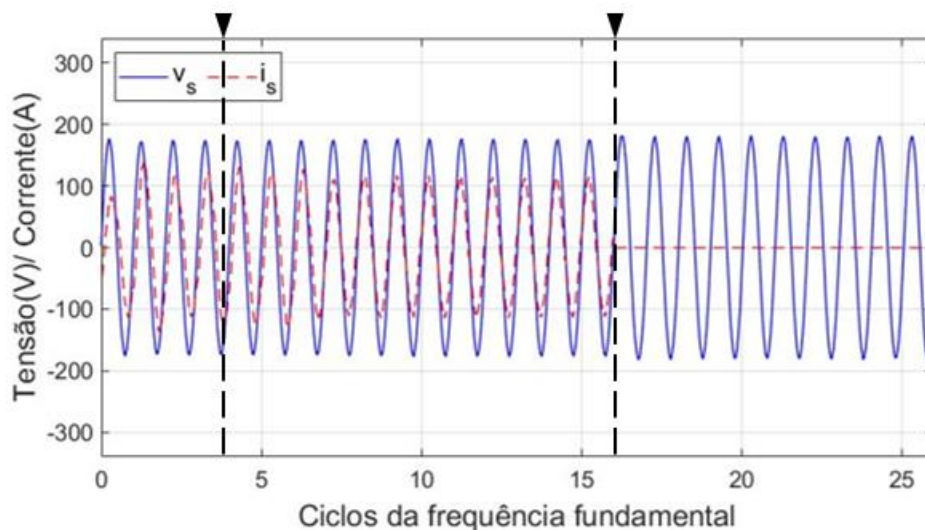
5.1.2 Cenário II - Transição para Modo Ilhado

Em um dado instante ocorre um ilhamento intencional e a microrrede passa a operar no modo ilhado, com o conversor multifuncional no modo IV. A sequência de operação é apresentada a seguir:

- $t=0s$ - o PAC da microrrede é energizado pela rede elétrica e a carga linear é conectada;
- $t=(1/60)s$ - a carga RL é conectada;
- $t=(4/60)s$ - o conversor multifuncional passa a operar como um filtro ativo paralelo no modo III;
- $t=(16/60)s$ - a chave SS-MR é aberta e o conversor multifuncional passa a operar como um formador de rede no modo IV;
- $t=(16/60)s$ - a carga não-linear é conectada;
- $t=(21/60)s$ - o supridor de rede é conectado e passa a injetar 10 kW;
- $t=(30/60)s$ - fim da simulação.

A Figura 38 ilustra os distúrbios na tensão da rede, quando em um dado instante ocorre um ilhamento intencional e o CMF passa a operar como formador de rede no modo IV. No instante $t=(16/60)s$, o CMF realiza uma transição suave para o modo ilhado, apenas mudando a referência para malha de controle de tensão.

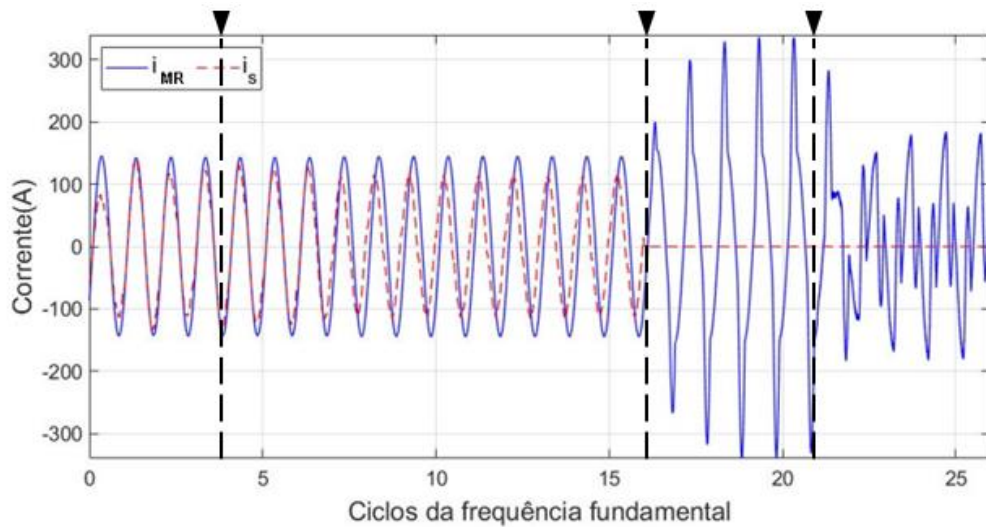
Figura 38 – Resultado da tensão na rede e corrente na rede



Fonte: Produção do próprio autor.

Na Figura 39 é possível notar que não ocorrem distúrbios na forma de onda da corrente no PAC da microrrede na transição intencional para o modo ilhado. No instante 16/60 ocorre o incremento da carga não-linear e no instante 21/60 a inserção do supridor de rede. Durante o modo conectado à rede, a corrente da microrrede (i_{MR}) é suprida pela rede principal, enquanto no modo ilhado passa a ser suprida pelo CMF.

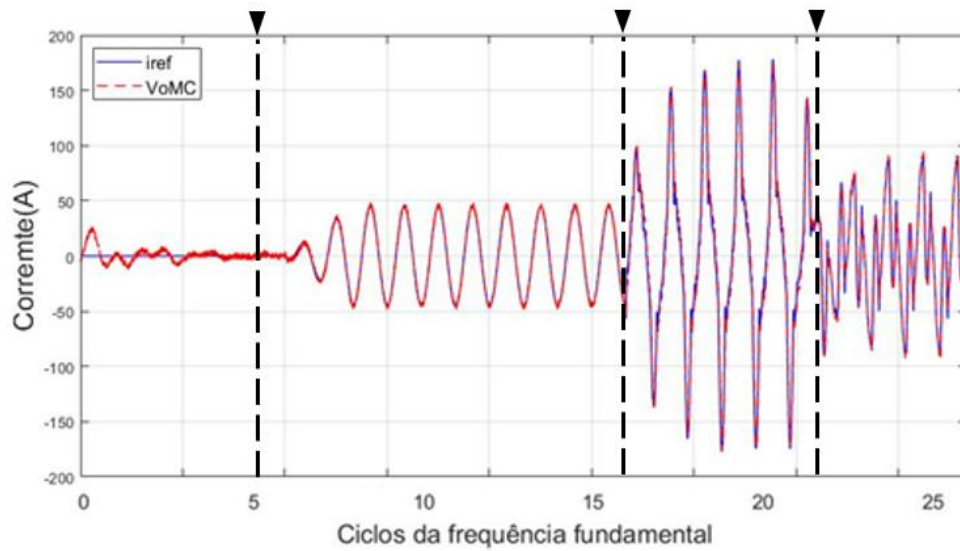
Figura 39 – Resultado da corrente na rede e corrente na microrrede



Fonte: Produção do próprio autor.

Na Figura 40, é ilustrada a resposta da malha de corrente do CMF. Até o instante $t=(16/60)s$ a referência provê funcionalidade de filtro ativo paralelo, enquanto posteriormente a esse instante passa a gerar uma referência para a malha de corrente. É possível notar que não ocorre nenhum transitório no PAC da microrrede, mesmo com a mudança do controle de corrente para tensão no CMF.

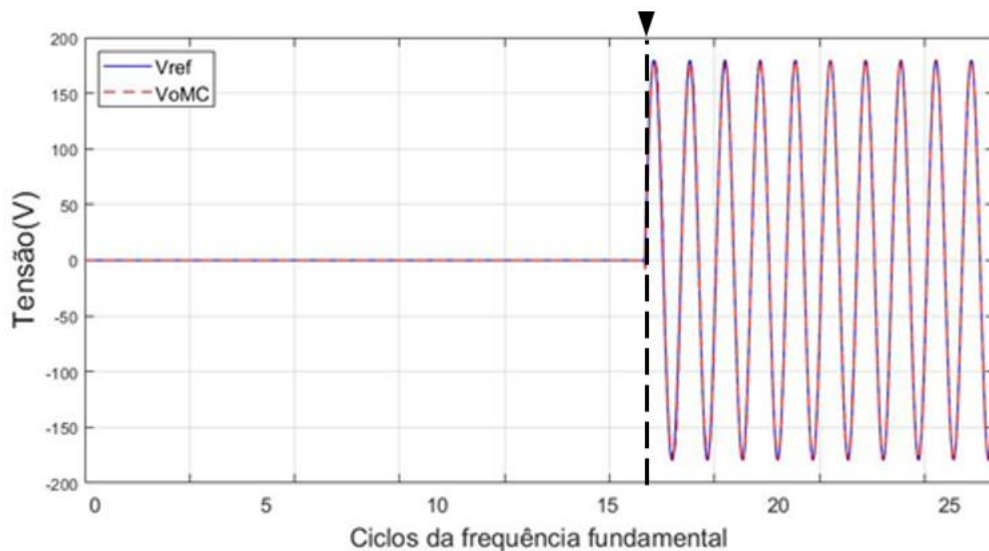
Figura 40 – Resposta da malha de tensão de referência



Fonte: Produção do próprio autor.

No instante $t=(16/60)s$ o CMF passa a atuar como um formador de rede, como uma fonte de tensão controlada. Assim na Figura 41 a malha de tensão a partir de $t=(16/60)s$ passa a gerar uma referência para a malha de corrente, com amplitude de 1 pu de tensão. É possível notar que não ocorre nenhum transitório no PAC da microrrede, mesmo com a mudança do controle de corrente para tensão no conversor multifuncional.

Figura 41 – Resposta da malha de tensão



Fonte: Produção do próprio autor.

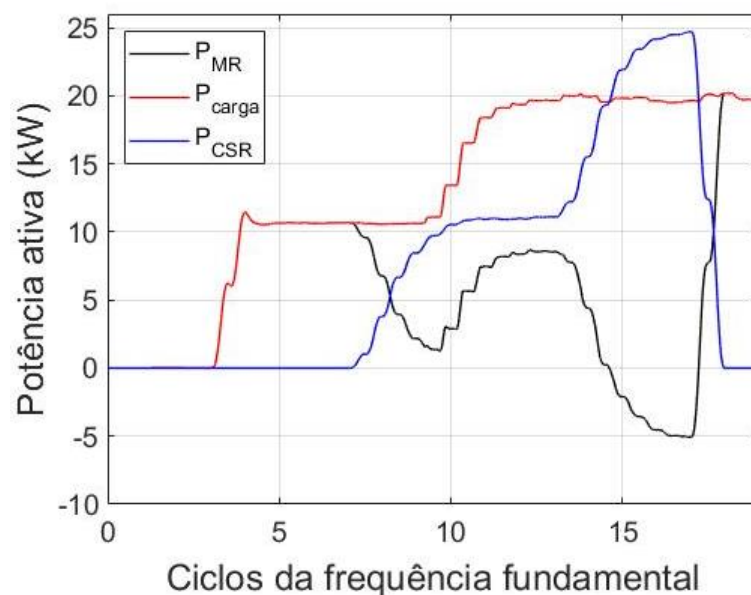
5.1.3 Cenário III - Operação no Modo Ilhado

Nesse cenário, o conversor multifuncional opera como formador de rede no modo IV. Toda a energia é extraída do banco de baterias para produzir um fluxo de potência ativa na microrrede. A seguir são apresentadas a sequência de operação. Para essa condição é considerada a presença do CSR como gerador distribuído na microrrede.

- $t = 0s$ - O PAC da microrrede é energizado pelo conversor multifuncional no modo formador de rede (modo IV);
- $t = (4/60)s$ - a carga RL é conectada;
- $t = (6/60)s$ - o suprridor de rede é conectado e passa a injetar 10 kW;
- $t = (11/60)s$ - o suprridor de rede passa a injetar 25 kW na microrrede;
- $t = (14/60)s$ - o suprridor de rede é desconectado da microrrede;
- $t = (21/60)s$ - fim da simulação.

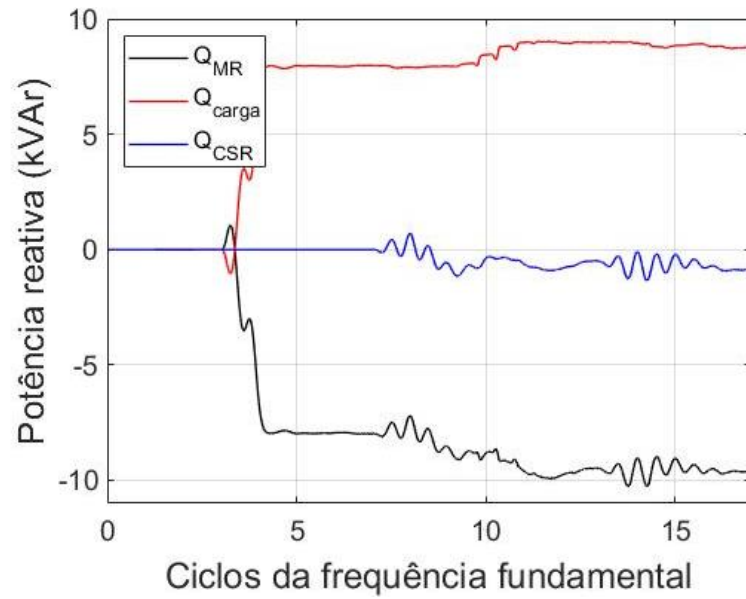
Como pode ser visto da Figura 42, o CFR absorve toda a potência ativa produzida pelo gerador distribuído em seu barramento CC, até o instante $t = (4/60)$ s. Em seguida, a carga linear é conectada, passando a ser suprida pelo gerador distribuído, e posteriormente pelo formador de rede. Já na Figura 43 é ilustrado que toda a potência reativa é suprida pelo formador de rede, pois o CSR somente contribui com a injeção de potência ativa.

Figura 42 – Potência ativa na microrrede no modo ilhado



Fonte: Produção do próprio autor.

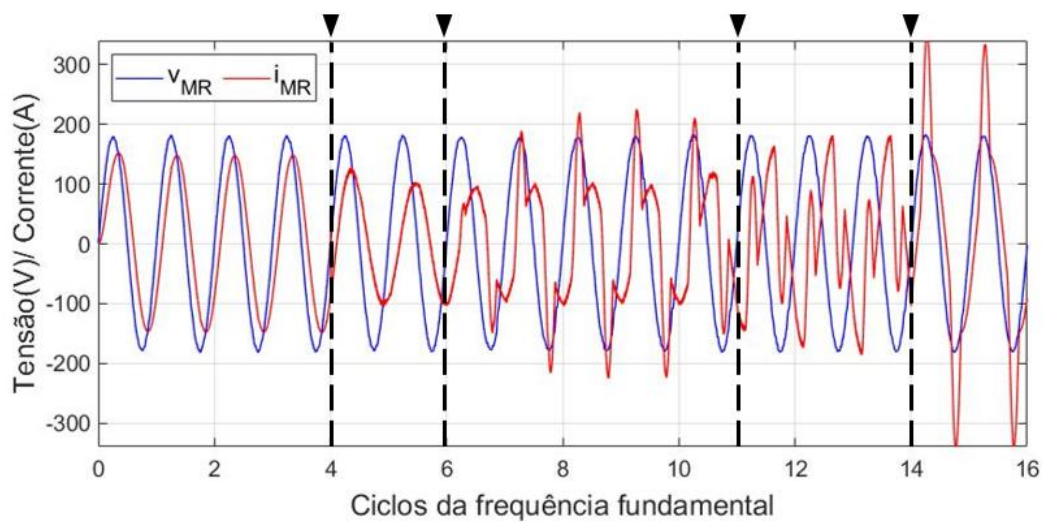
Figura 43 – Potência reativa na microrrede no modo ilhado



Fonte: Produção do próprio autor.

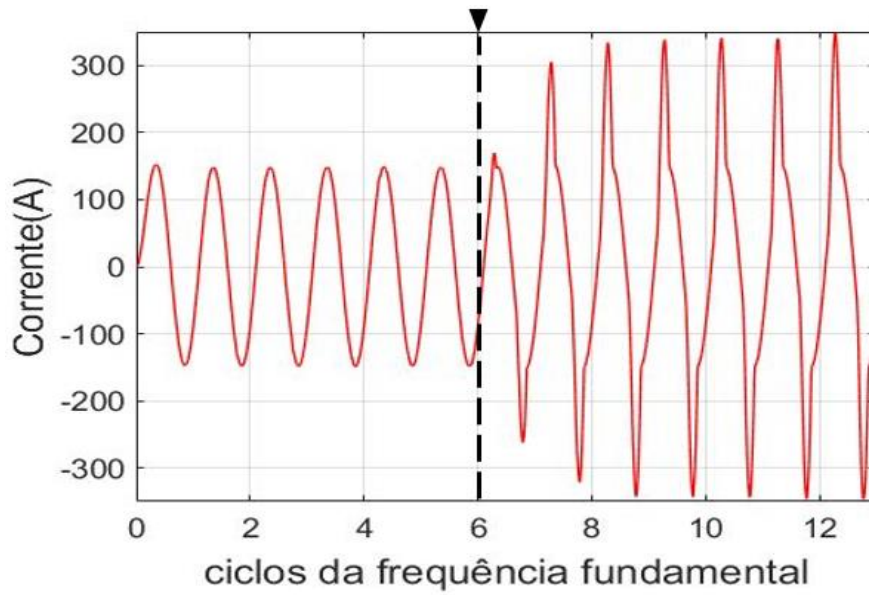
Da Figura 44 é possível observar as formas de onda da tensão e corrente na microrrede. A forma de onda da tensão no PAC se mantém senoidal, mesmo com a conexão das cargas e do gerador distribuído. A Figura 45 apresenta a forma de onda da corrente na carga e a Figura 46, a forma de onda da corrente no GD.

Figura 44 – Tensão e corrente na microrrede no modo ilhado



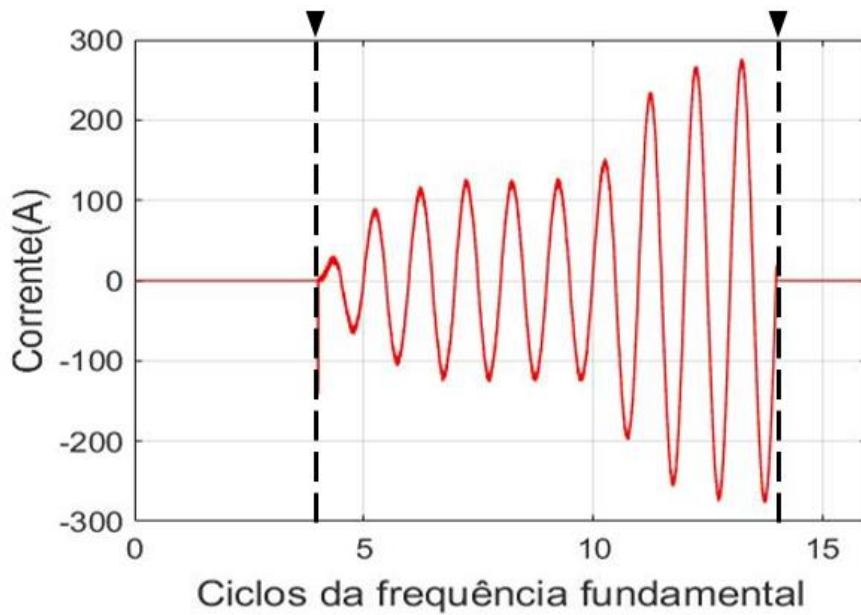
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 45 – Corrente na carga no modo ilhado



Fonte: Produção do próprio autor.

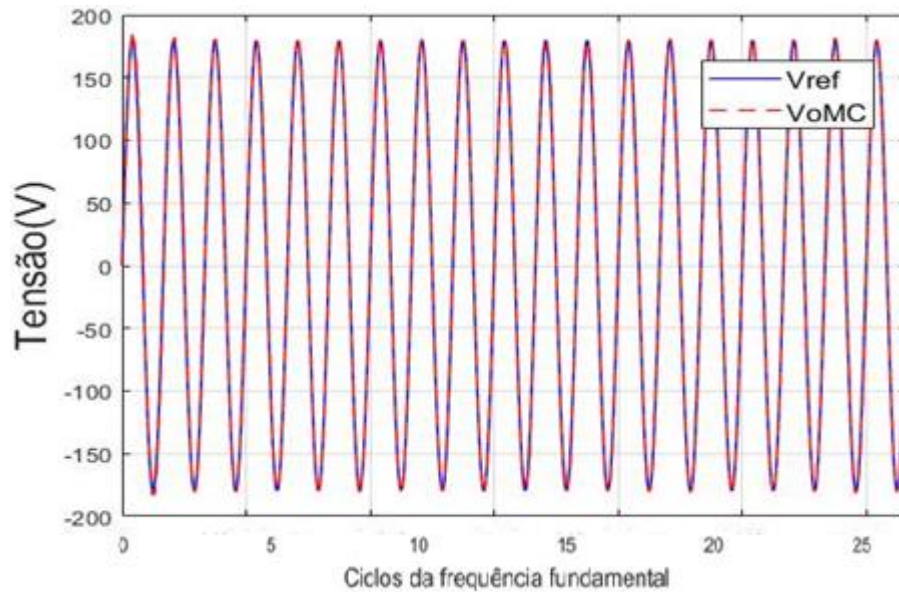
Figura 46 – Resultado da corrente no gerador distribuído



Fonte: Produção do próprio autor.

Na Figura 47 é apresentada a resposta da malha de tensão do controle, é possível ver que o controle passa a gerar uma referência para a malha de corrente, com amplitude de 1 pu de tensão. Com isso é possível concluir que o CMF operando como formador de rede no modo IV pode sustentar a microrrede, mantendo-a ativa e ilhada da rede elétrica principal.

Figura 47 – Resultado da resposta da malha de tensão



Fonte: Produção do próprio autor.

5.1.4 Cenário IV - Reconexão ao Modo Conectado à Rede

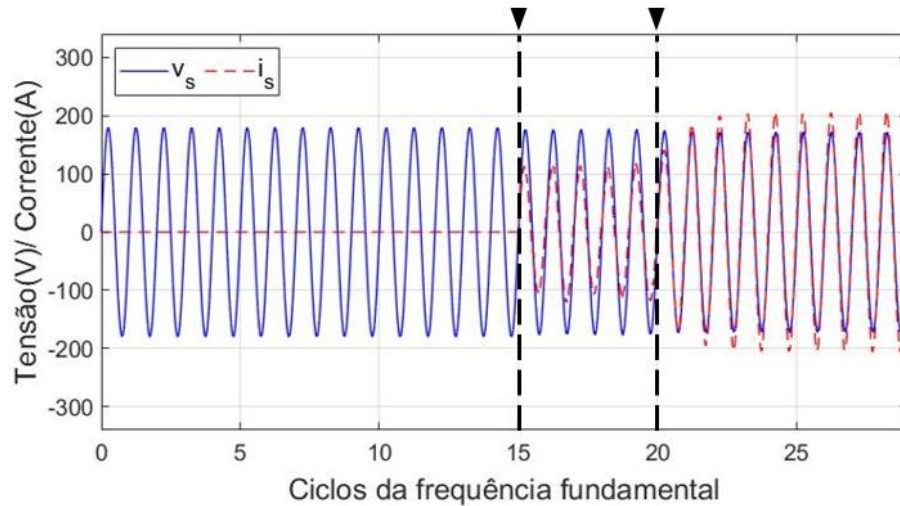
No cenário IV é avaliada a transição da microrrede para o modo conectado à rede. Inicialmente a microrrede está no modo ilhado, com o CMF operando como formador de rede. A Figura 48 apresenta os principais resultados desse cenário, com sequência de operação definida como:

- $t=0$ s - a microrrede opera no modo ilhado. A rede principal não está disponível;
- $t=(1/60)$ s - a carga não-linear é conectada na microrrede;
- $t=(4/60)$ s - a rede elétrica passa a ficar disponível e o conversor multifuncional inicia a sincronização entre a tensão da microrrede com a rede elétrica;
- $t=(15/60)$ s - depois de finalizada a sincronização da microrrede com a rede elétrica, a chave SS-MR é fechada. O conversor multifuncional muda o seu modo de controle para fonte de corrente e alimenta a microrrede.
- $t=(20/60)$ s – a carga não-linear é conectada na microrrede;
- $t=(30/60)$ s - fim da simulação.

Da Figura 49, é possível notar que durante a transição para o modo conectado, no instante $t=(15/60)$ s, não surge um valor crítico de tensão e corrente no PAC da microrrede. Deve ser

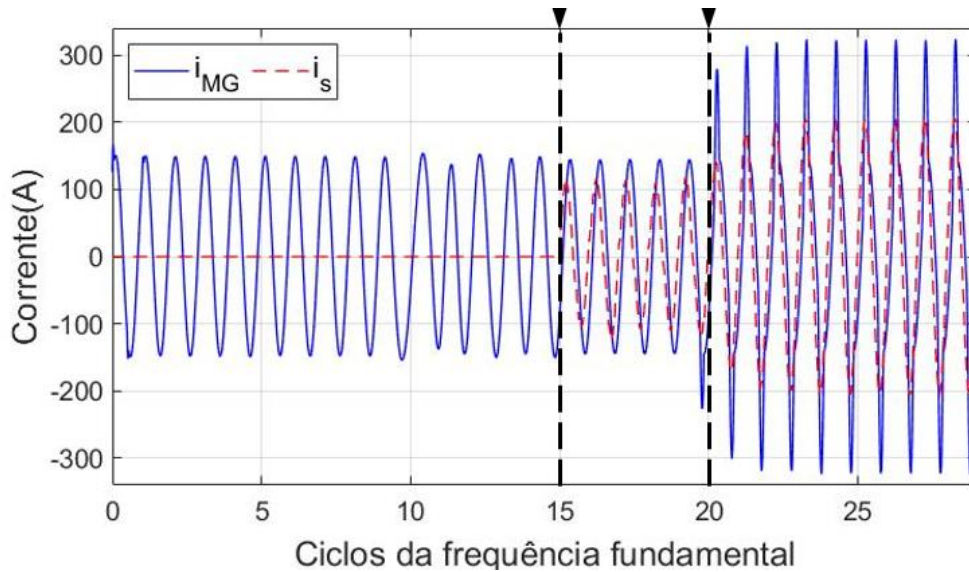
ressaltado que na transição de reconexão o conversor multifuncional mudou sua operação para fonte de corrente controlada, sendo que inicialmente era controlado como uma fonte de tensão.

Figura 48 – Resultado da tensão na rede e corrente na rede



Fonte: Produção do próprio autor.

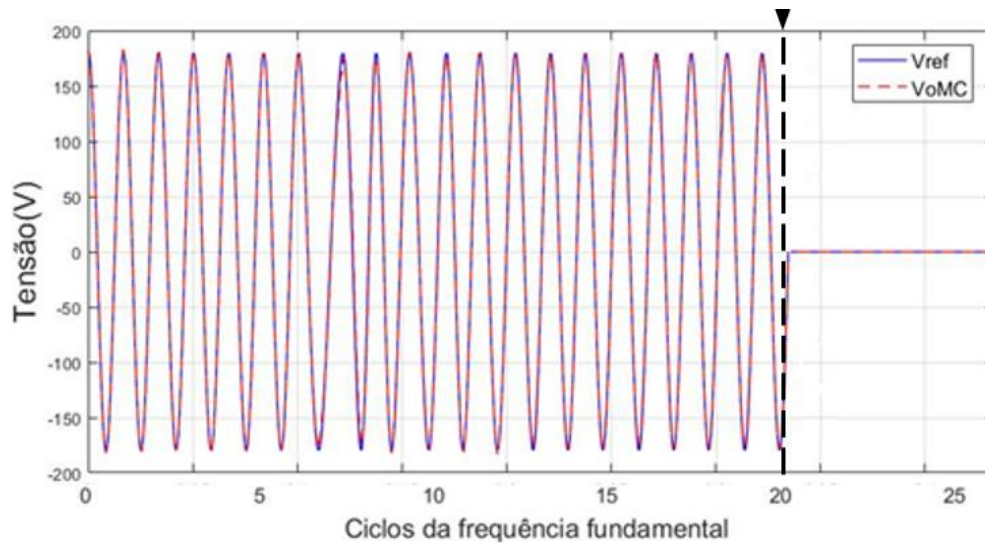
Figura 49 – Resultado da corrente na microrrede e da corrente na rede



Fonte: Produção do próprio autor.

Na Figura 50 é apresentada a resposta da malha de tensão do controle, é possível ver que o controle para de gerar uma referência para a malha de corrente, no instante $t=(15/60)s$.

Figura 50 – Resultado da tensão de referência do controle



Fonte: Produção do próprio autor.

5.2 Comentários Sobre a Operação do Conversor Multifuncional

Esta seção apresentou os principais resultados da operação do conversor multifuncional em uma microrrede CA monofásica. Foram apresentados os quatro modos de operação do conversor multifuncional, assim como suas aplicações.

Para o cenário I é apresentada operação do conversor multifuncional no modo III, atuando como um filtro ativo paralelo com compensação harmônica e correção do fator de potência. Já no cenário II, o conversor fez um ilhamento intencional, comutando sua operação do modo fonte de corrente para fonte de tensão controlada, sem causar distúrbios no PAC da microrrede.

É possível ver que no cenário III, o conversor multifuncional opera como formador de rede no modo IV mantendo a microrrede ativa e ilhada da rede elétrica principal. Por fim, foi avaliada a transição de reconexão para o modo conectado à rede. Nesse cenário é demonstrado que o conversor multifuncional pode fazer esta transição, comutando sua operação do modo fonte de tensão para fonte de corrente controlada.

Os principais resultados obtidos com o conversor multifuncional demonstram que a configuração é promissora, podendo desempenhar múltiplas funcionalidades em um ambiente de microrredes de energia elétrica.

6 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um conversor com uma aplicação multifuncional, com configuração típica de formador de rede e suporte à rede. Foram detalhados por meio de simulação, os quatro modos de operação do conversor multifuncional, onde foi utilizado o modelo de uma microrrede monofásica, formada pelo conversor multifuncional, gerador distribuído e carga elétrica do tipo linear e não-linear.

Avaliando os cenários é possível notar que a operação do conversor multifuncional como filtro ativo melhora a qualidade da energia elétrica na rede, fazendo com que a corrente na rede se torne senoidal, as taxas de distorções harmônicas diminuam e o fator de potência do sistema se aproxime do valor unitário. Para os casos de um ilhamento intencional ou uma reconexão, o conversor comutou sua operação sem causar distúrbios no PAC da microrrede, demonstrando que sua operação na rede é benéfica. E em casos, onde a rede elétrica se encontrou ausente, o conversor multifuncional mostrou-se eficaz para operar a microrrede, mantendo-a ativa e ilhada da rede elétrica principal.

Os resultados demonstrados destacam que o conversor multifuncional é uma configuração promissora, com a capacidade de desempenhar múltiplas funcionalidades. Como trabalhos futuros, ainda podem ser exploradas outras aplicações, como investigar um algoritmo ativo para detecção de ilhamento não-intencional em uma microrrede e realizar a montagem experimental do conversor multifuncional, para validar todos os seus modos de operação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLAF, B. A. Power system monitoring and analysis. *In: ENERGY CONFERENCE AND EXHIBITION*, 2010, Manama, Bahrein. **Proceedings** [...]. Manama: IEEE, 2010. p. 297-301.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST: Módulo 3 – Acesso ao Sistema de Distribuição**. 2017. Disponível em: https://www.aneel.gov.br/documents/656827/14866914/PRODIST-Módulo3_Revisão7/. Acesso em: 14 mar. 2020.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Banco de Informações da Geração (BIG)**, 2019. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao>. Acesso em: 20 mar. 2020.

ANTUNES, H. M. A. **Conversor Multifuncional Reconfigurável e Tolerante a Falhas para Microrredes de Energia Elétrica**. 2018. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

ARAUJO, L. S. **Controle de Conversores em Microrredes Autônomas com Sistemas de Armazenamento Distribuídos**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2017.

AZEVEDO, G. M. S. **Controle e Operação de Conversores em Microrredes**. 2013. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

BEVRANI, H.; WATANABE, M.; MITANI, Y. **Power System Monitoring and Control**. [S.l.]: Wiley, 2014.

BHASKARA, S. N.; CHOWDHURY, B. H. Microgrids - A review of modeling, control, protection, simulation and future potential. *In: IEEE POWER AND ENERGY SOCIETY GENERAL MEETING*, 2012, San Diego. **Proceedings** [...]. San Diego: IEEE, 2012. p. 1-7.

BONALDO, J. P. **Multifuncionalidade de conversores eletrônicos de potência utilizados em microrredes inteligentes**. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2015.

BUSO, S.; MATTAVELLI, P. **Digital Control in Power Electronics**. 2. ed. Padova, Itália: Morgan & Claypool Publishers, 2015.

DRIESEN, J.; VISSCHER, K. Virtual synchronous generators. *In: POWER AND ENERGY SOCIETY GENERAL MEETING CONVERSION AND DELIVERY OF ELECTRICAL ENERGY IN THE 24ST CENTURY*, 1., 2008. Pittsburgh. **Proceedings** [...]. Pittsburgh: IEEE, 2008. p. 1-3.

EID, B. M. Control methods and objectives for electronically coupled distributed energy resources in microgrids: A review. **IEEE Systems Journal**. v. 10, n. 2, p. 446-458, 2014.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE Std 1547.4**: IEEE Guide for Design, Operation, and Integration of Distributed Resource Island Systems with Electric Power Systems. New York: IEEE, 2011.

LASSETER, R. H. Microgrids. *In*: POWER ENGINEERING SOCIETY WINTER MEETING, 1., 2002, Nova York. **Proceedings** [...]. New York: IEEE, 2002. p. 146-149.

LOPES, B. M.; SILVA, S. M.; CARDOSO FILHO, B. J.; BRITO, J. A. S.; AGUIAR, G. T. Análise crítica de dispositivos estáticos de compensação série de baixa tensão com transformadores shunt: Custos versus funcionalidade. **Eletrônica de Potência**, Rio de Janeiro, v. 11, n. 1, p. 86-103, 2006.

LOPES, J. A. P.; MOREIRA, C. L.; MADUREIRA, A. G. Defining control strategies for microgrids islanded operation. **IEEE Transactions on Power Systems**, São Petersburgo, v. 21, n. 1, p. 916-924, 2006.

MATOS, J. G.; RIBEIRO, L. A. S.; SILVA, F. S. F. Controle da potência gerada em microrredes autônomas e isoladas com fontes de energia renováveis e sistema de armazenamento com bancos de baterias. **Eletrônica de Potência**, São Luís, v. 19, n. 2, p. 57-62, 2014.

MELO, N. R.; NOBREGA, R. V. T. **Dimensionamento e simulação de uma microrrede utilizando geração conjunta eólica/solar aplicada em um condomínio residencial na cidade de Janaúba/MG**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

MESSENGER, R.; ABTAHI, A. **Photovoltaic systems engineering**. [S.l.]: CRC Press, 2010.

NASCIMENTO, B. N. **Uma proposta de Metodologia de Corte de Carga em Microrredes Ilhadas**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2016.

PAQUETTE, A. D.; DIVAN, D. M. Providing improved power quality in microgrids: difficulties in competing with existing power-quality solutions. **IEEE Industry Applications Magazine**, Georgia, v. 20, n. 5, p. 34-43, 2014.

PAREDES, H. K. M.; BRANDÃO, D. I.; TERRAZAS, T. M. Shunt active compensation based on the Conservative Power Theory current's decomposition. *In*: BRAZILIAN POWER ELECTRONICS CONFERENCE, 11., 2011, Sorocaba. **Proceedings** [...]. Sorocaba: IEEE, 2011. p. 788-794.

PARHIZI, S. LOTFI, H.; KHODAEI, A. State of the art in research on microgrids: A review. **IEEE Access**, Denver, v. 3, n. 3, p. 890-925, 2015.

POPOV, M.; KARIMI, H. Dynamic model and control of a microgrid with passive loads. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER SYSTEMS TRANSIENTS*, 9., 2009, Kyoto. **Proceedings** [...]. Kyoto: IEEE, 2009. p. 605-618.

REZNIK, A.; SIMÕES, M.; MUYEEN, S. LCL filter design and performance analysis for small wind turbine systems. *In: POWER ELECTRONICS AND MACHINES IN WIND APPLICATIONS*, 2., 2012, Denver. **Proceedings** [...]. Denver: IEEE, 2012. p. 17-27.

ROCABERT, J.; LUNA, A.; BLAABJERG, F. Control of power converters in ac microgrids. **IEEE Transactions on Power Electronics**, Barcelona, v. 27, n. 11, p. 4734-4749, 2012.

RYAN, M. J.; BRUMSICKLE, W. E.; LORENZ, R. D. Control topology options for single-phase ups inverters. **IEEE Transactions on Industry Applications**, Madison, v. 33, n. 2, p. 493-501, 1997.

SILVA, F. L. **Análise do desempenho de uma microrrede com múltiplas unidades de geração distribuída**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2011.

TABATABAEE, S.; KARSHENAS, H. R.; BAKHSHAI, A. Investigation of droop characteristics and x/r ratio on small-signal stability of autonomous microgrid. *In: POWER ELECTRONICS, DRIVE SYSTEMS AND TECHNOLOGIES CONFERENCE*, 2., 2011, Tehran. **Proceedings** [...]. Tehran: IEEE, 2011. p. 223-228.

TEKE, A.; LATRAN, M. B. Review of multifunctional inverter topologies and control schemes used in distributed generation systems. **Journal of Power Electronics**, Cukurova, v. 14, n. 2, p. 324-340, 2014.

TENTI, P. CALDOGNETTO, T.; BUSO, S. Control of utility interfaces in low voltage microgrids. *In: POWER ELECTRONICS FOR DISTRIBUTED GENERATION SYSTEMS*, 5., 2014, Galway. **Proceedings** [...]. Galway: IEEE, 2014. p. 3-8.

TEODORESCU, R.; LISERRE, M.; RODRIGUEZ, P. **Grid converters for photovoltaic and wind power systems**. 1. Ed., Chichester: John Wiley & Sons, 2011.

VACIOTO, E. F.; GONZATTI, R.; FERREIRA, C. Bidirectional converter for distributed generation with grid-supporting capacity. *In: BRAZILIAN POWER ELECTRONICS CONFERENCE*, 13., 2015, Fortaleza. **Proceedings** [...]. Fortaleza: IEEE, 2015. p. 1-6.

WANG, X.; GUERRERO, J. M.; BLAABJERG, F. A review of power electronics based microgrids. **Journal of Power Electronics**, Barcelona, v. 12, n. 1, p. 181-192, 2012.

ZHANG, Z.; CHEN, W. A new seamless transfer control strategy of the microgrid. **The Scientific World Journal**, Cairo, v. 14, n. 1, p. 3-9, 2014.

ZHOU, K.; LOW, K.; WANG, D. Zero-phase odd-harmonic repetitive controller for a single-phase pwm inverter. **IEEE Transactions on Power Electronics**, Nanyang, v. 21, n. 1, p. 193-201, 2006.