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

LETÍCIA DE ASSIS VIEIRA

SIMULAÇÃO DE UM CONVERSOR FORMADOR DE REDE CONECTADO A UMA MICRORREDE DE ENERGIA ELÉTRICA

VITÓRIA
2022

LETICIA DE ASSIS VIEIRA

SIMULAÇÃO DE UM CONVERSOR FORMADOR DE REDE CONECTADO A UMA MICRORREDE DE ENERGIA ELÉTRICA

Parte manuscrita do Projeto de Graduação da aluna Letícia de Assis Vieira, apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheira Eletricista.

_____
Prof. Dr. Hélio Marcos André Antunes
Orientador

_____
Letícia de Assis Vieira
Aluna

VITÓRIA
2022

LETICIA DE ASSIS VIEIRA

SIMULAÇÃO DE UM CONVERSOR FORMADOR DE REDE CONECTADO A UMA MICRORREDE DE ENERGIA ELÉTRICA

Parte manuscrita do Projeto de Graduação da aluna Letícia de Assis Vieira, apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheira Eletricista.

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Hélio Marcos André Antunes
Orientador

Prof. Dr. Augusto César Rueda Medina
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador

Eng. Rafael Cabral Knaip Krause
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador

VITÓRIA
2022

RESUMO

O setor elétrico brasileiro (SEB) vem apresentando transformações a partir da modernização das tecnologias desenvolvidas no mercado. Em razão dessa reestruturação do SEB, novos modelos de geração de energia estão surgindo, tendo como exemplo a geração distribuída (GD). A GD vem ganhando espaço dentro do setor elétrico, e seus estímulos justificam-se pelos benefícios que este modelo pode proporcionar ao sistema elétrico, como adiamento de investimentos em expansão dos sistemas de transmissão e distribuição, baixo impacto ambiental, redução no carregamento das redes, minimização de perdas elétricas e diversificação da matriz energética. Nesse contexto, o conceito de microrrede aparece sendo definido como integração de recursos de geração distribuída, armazenadores de energia e cargas em um sistema capaz de operar conectado a uma rede principal e, em casos de emergência ou de eventos programados, de operar de forma isolada, controlando a frequência e a tensão de modo a prover condições para ações de recomposição. Em uma microrrede (MR), os conversores eletrônicos são divididos em formador de rede (CFR), supridor de rede e suporte à rede. Nesse cenário, o presente projeto de pesquisa apresenta o controle de um conversor formador de rede que garanta tensão e frequência constantes no barramento de alimentação de uma microrrede CA, operando adequadamente em modo ilhado com controle centralizado, bem como sua operação no modo conectado à rede. A partir da simulação do CFR é observado o fluxo de potência da MR quando operada conectada à rede elétrica e na operação isolada. Deste modo, o CFR demonstra eficácia tanto no modo fonte de corrente como no modo fonte de tensão.

Palavras-chave: Setor elétrico brasileiro. Geração distribuída. Microrrede. Conversor formador de rede.

ABSTRACT

The Brazilian electricity sector (SEB) has been presenting transformations from the modernization of technologies developed in the market. Due to this restructuring of the SEB, new models of energy generation are emerging, with distributed generation (GD) as an example. GD has been gaining space within the electric sector, and its stimuli are justified by the benefits that this model can provide to the electric system, such as postponing investments in the expansion of transmission and distribution systems, low environmental impact, reduction in network loading, minimization of electrical losses, and diversification of the energy matrix. In this context, the concept of microgrids is defined as the integration of distributed generation resources, energy storage and loads in a system capable of operating connected to the main grid and, in cases of emergency or programmed events, operating in isolation, controlling frequency and voltage in order to provide conditions for recovery actions. In an MR, electronic converters are divided into network-former, network-supplier, and network-support. In this scenario, the present research project presents the control of a grid-forming converter that ensures constant voltage and frequency on the power bus of an AC microgrid, operating properly in islanded mode with centralized control, as well as its operation in grid-connected mode. From the CFR simulation the power flow of the MR when operated connected to the grid and in isolated operation is observed. Thus, the CFR demonstrates effectiveness in both current source mode and voltage source mode.

Keywords: Brazilian electrical sector. Distributed generation. Microgrids. Grid-forming converter.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Típica configuração de uma microrrede 17

Figura 2 – Microfontes de geração distribuída.....18

Figura 3 – Controle MMO, com modo SMO integrado.....20

Figura 4 – Configuração do conversor supridor de rede 21

Figura 5 – Esquema básico de um formador de rede 22

Figura 6 – Inversor monofásico em ponte H.....23

Figura 7 – Diagrama de controle do formador de reme monofásico 24

Figura 8 – Configuração da microrrede analisada.....25

Figura 9 – Configuração de filtros passivos.....27

Figura 10 – Circuito equivalente do CFR conectado à rede elétrica.....29

Figura 11 – Diagrama com a planta do filtro LC 30

Figura 12 – Controle do inversor do CFR no modo fonte de corrente.....31

Figura 13 – Controle do CFR no modo Vf.....32

Figura 14 – Circuito equivalente do CSR conectado à rede elétrica.....33

Figura 15 – Diagrama de controle do CSR 34

Figura 16 – Modelo da microrrede de energia elétrica no Matlab/Simulink 35

Figura 17 – Fluxo de potência ativa no PAC 36

Figura 18 – Fluxo de potência reativa no PAC 37

Figura 19 – Grandeza elétrica no PAC da microrrede: Tensão rms por fase.....38

Figura 20 – Grandeza elétrica no PAC da microrrede: Frequência elétrica.....38

Figura 21 – Fluxo de potência ativa na microrrede operando isolada 40

Figura 22 – Fluxo de potência reativa na microrrede operando isolada 40

LISTA DE FIGURAS

Figura 23 – Microrrede na operação isolada: Tensão rms por fase 41

Figura 24 – Microrrede na operação isolada: Frequência elétrica 42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características elétricas da microrrede analisada 26

Tabela 2 – Ganho dos controladores das malhas do CFR 33

Tabela 3 – Ganho dos controladores do CSR.....35

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BT	Baixa tensão
CA	Corrente alternada
CCMR	Centro de controle da microrrede
CFR	Conversor formador de rede
CL	Controlador local
CSR	Conversor supridor de rede
FC	Fonte de corrente
GD	Geração distribuída
MF	Microfonte
MMO	*Multi-masteroperation*
MR	Microrrede
MT	Média tensão
OM	Operador de mercado
ORD	Operador da rede de distribuição
PAC	Ponto de acoplamento comum
PQ	Potência ativa e reativa
SEB	Setor elétrico brasileiro
SMO	*Single-masteroperation*
T&D	Transporte e distribuição
VSI	*Voltage source inverter*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO **11**
1.1 JUSTIFICATIVA **14**
1.2 OBJETIVOS GERAL E ESPECÍFICO **14**
1.2.2 Objetivo Geral **14**
1.2.3 Objetivos Específicos **14**
1.3 METOLOGIA **15**
1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO **15**
2 REFERENCIAL TEÓRICO **17**
2.1 MICRORREDE **17**
2.1.1 Microfontes **18**
2.1.2 Controle da Microrrede **19**
2.2 MODOS DE OPERAÇÃO **19**
2.2.1 Modo Ilhado **19**
2.3 CONVERSORES **21**
2.3.1 Conversor Supridor de Rede **21**
2.3.2 Conversor Suporte à Rede **21**
2.3.3 Conversor Formador de Rede **22**
2.3.3.1 Controle do Conversor Formador de Rede **23**
2.3 Conclusões Sobre o Referencial Teórico **24**
3. ESTUDO DA MICRORREDE DE ENERGIA ELÉTRICA **25**
3.1 MICRORREDE EM ANÁLISE **25**
3.1.1 Carga Elétrica da Microrrede **26**
3.1.2 Filtro Passivo **27**
3.1.3 Conversor Formador de Rede **28**
3.1.4 Conversor Supridor de Rede **33**
3.2 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO **35**
3.2.1 Operação conectado à rede elétrica **35**
3.2.2 Operação em modo ilhado **39**
4 CONCLUSÃO **43**
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 44

1 INTRODUÇÃO

A geração de energia centralizada convencional é conhecida como um conjunto formado por grandes centrais de geração e o sistema de potência por uma ampla rede de linhas de transmissão e de distribuição que alimentam os consumidores em potencial. No Brasil, a geração centralizada tem como essência o uso de grandes usinas hidroelétricas (SILVA,2011).

A produção descentralizada em algumas aplicações permite reduzir o investimento necessário e aumentar a eficiência global do sistema, bem como as perdas na transmissão. Do ponto de vista da confiabilidade, o emprego de várias pequenas unidades de geração é mais favorável em razão da diversidade no fornecimento de energia (SANTOS, 2008).

Nos países desenvolvidos, a maior parte da energia elétrica produzida provém de grandes centrais centralizadas produtoras de energia. Em contraste, a geração distribuída atua em pequena escala a partir de diversos recursos energéticos, principalmente, oriundos de fontes renováveis de energia (*INTERNATIONAL ENERGY AGENCY*, 2018).

Em zonas rurais/remotas, onde a geração de energia centralizada é inviável, em decorrência dos elevados custos de transmissão e distribuição, e onde há deficiências nos sistemas de transmissão, a integração de sistemas de geração distribuída aponta-se como uma alternativa viável e atraente para os consumidores e serviços públicos (RAJKUMAR, 2012).

A geração distribuída propicia inúmeros benefícios, por estar localizada próxima à carga. Admite, também, o atendimento da demanda crescente de forma rápida, considerando que a construção de grandes usinas hidrelétricas é um processo demorado. Assim, como no exterior,a inserção de geração distribuída (GD) no sistema brasileiro tende a se tornar mais comum, à medida que as normas forem estabelecidas (RAJKUMAR, 2012).

Diante dos problemas associados à disponibilidade elétrica, dificuldades econômicas, ambientais, algumas razões podem ser apontadas para o aumento da integração de instalações de GD:

- a proximidade das unidades de GD junto dos consumidores finais evita e reduz os

custos ligados ao transporte e distribuição (T&D) de energia;

- o desenvolvimento tecnológico quanto à eficiência das unidades de GD permitiu com que as instalações disponíveis pudessem passar de uma capacidade de poucos kW a centenas de MW com reduzidos custos;
- a integração de pequenas unidades de geração ao longo do sistema de energia permite lidar com a procura de energia elétrica em certas áreas, podendo, em algumas situações, criar atividades autossuficientes e economizar energia, devido às instalações de GD serem de pequeno porte;
- há uma maior facilidade de encontrar locais para o seu posicionamento, normalmente, as instalações de GD apresentam um tempo de construção reduzido, fruto dos módulos pré-construídos, e têm um risco de investimento menor.

A introdução de GD trouxe ao setor elétrico um novo conceito: a microrrede (MR). Uma MR representa um sistema elétrico composto de várias pequenas unidades geradoras com centenas de kW, conectadas ao barramento de baixa tensão da rede elétrica (LASSETER, 2002). Engloba a geração, distribuição e consumo de eletricidade em uma área reduzida. Todavia, a MR 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. A MR é vista pelo sistema central como uma única célula de geração de energia, composta por várias outras células de geração. Estas novas estruturas do sistema elétrico integram dispositivos avançados de produção e conversão de energia elétrica, além de incorporarem estratégias modernas e sofisticadas de controle, automação e comunicação.

O conceito de MR tem se propagado em todo o mundo. Em alguns países já existem implementações de MRs alimentando diversas cargas. O Japão é o país com mais pesquisas envolvendo microrredes. O governo japonês tem investido em fontes renováveis de geração de energia. Foi criado no país o *New Energy and Industrial Technology Development Organization (*NEDO), no qual vários projetos foram executados em diversas cidades como Aomori, Aichi, Kyoto e Sendai (HATZIARGYRIOU et al., 2008). Na Grécia há um protótipo de uma microrrede na Universidade Tecnológica de Atenas (NTUA, do inglês *National Technical Universtyof Athens*), e nesse protótipo há painéis fotovoltaicos e uma turbina eólica, baterias e cargas (BARNES et al, 2005). Nos Estados Unidos foi criado o programa CERTS (*Consortium for Electric Reliability Technology Solutions*) com o objetivo de estudar o

impacto da microrrede no sistema elétrico e procurar soluções para esses problemas (STEVENS,VOLLKOMMER, KLAPP, 2007).

Gigantes da indústria também têm investido em pesquisas sobre microrredes, das quais a ABB, Siemens, Anco, General Motors, General Eletric e concessionárias de energia. Dentre elas, destaca-se a General Eletric que investiu quatro milhões de dólares para desenvolvimento de controle, proteção e gerenciamento de energia em uma microrrede (HATZIARGYRIOU et al, 2007).

Uma MR pode operar em quatro modos, segundo o padrão IEEE Std 1547.4 (*STANDARDS ASSOCIATION*, 2011): modo conectado à rede elétrica principal, transição para o modo ilhado, modo ilhado ou isolado e modo de reconexão da microrrede.

Atuar em modo ilhado é um dos principais benefícios das microrredes. As MRs construídas no interior de uma rede de distribuição permitem que a confiabilidade seja aprimorada significativamente, pois se garante por maior tempo a continuidade no fornecimento de energia elétrica, evitando falhas habituais do sistema elétrico. As MRs remotas, por sua vez, são estabelecidas pela operação ilhada (LOPES, 2006).

Para se passar do modo ilhado para o conectado à rede elétrica, e vice-versa, não basta que uma chave seja fechada ou aberta entre a rede e a MR. Condições específicas devem ser atendidas antes da troca de modo de operação e, durante as transições, perturbações devem ser evitadas para que não ocorram danos em nenhum dos dois sistemas. Estabelecida a conexão, a MR ganha novas funções. Este conjunto de quesitos está intimamente relacionado aos métodos de controle aplicados (KATIRAEI, 2008).

Em uma MR CA é possível encontrar conversores eletrônicos desempenhando funções distintas. Segundo Rocabert et al. (2012) e Majumder e Bag (2014), esses conversores podem ser divididos em três categorias: supridor de rede, suporte à rede e formador de rede (CFR). O conversor supridor de rede é responsável por processar a energia proveniente das fontes primárias de energia e pode suprir a microrrede com a energia necessária ao consumo das cargas conectadas à MR. O conversor de suporte à rede têm como função produzir ou absorver potência ativa e reativa com o objetivo de contribuir com a regulação da tensão no ponto de acoplamento comum em que a MR é instalada. E, por fim, o formador de rede tem a função

de formar a MR quando esta opera no modo ilhado. A partir de uma fonte geradora estável, o CFR fornece as referências de tensão e frequência da MR para que os outros conversores possam realizar o sincronismo com a rede elétrica.

1.1 JUSTIFICATIVA

As redes de distribuição de energia elétrica pertencem ao segmento dos sistemas elétricos de potência que acompanham as mudanças, devido à presença da GD e aos avanços tecnológicos nas áreas de instrumentação, automação, medição, tecnologia da informação e comunicação.

Ao incrementar um sistema de distribuição com (GD), determina-se um conjunto de requisitos de funcionamento à rede: um fluxo de potência inverso, flutuações no perfil de tensão, aumento dos níveis de falhas, redução das perdas de energia, distorção harmônica e problemas de estabilidade, que afetam o funcionamento do sistema elétrico devido a ausência de manutenção na rede (RAJKUMAR, 2012).

Diante da questão, para garantir a qualidade e continuidade de serviço, além de manter a estabilidade do sistema elétrico como um todo, destaca-se como promissor o estudo da aplicação de um conversor formador de rede que tem a função de produzir tensão e frequência trabalhando no modo V-f para a operação no modo ilhado da microrrede. Além disso, o formador de rede tem que operar com algum sistema de armazenamento de energia ou fonte primária com disponibilidade a qualquer momento, garantindo a sua operação como fonte de tensão controlada.

1.2 OBJETIVOS GERAL E ESPECÍFICO

1.2.2 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho consiste em simular um conversor formador de rede conectado a uma microrrede de energia elétrica trifásica no modo ilhado e conectado.

1.2.3 Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo geral deste trabalho de avaliar e investigar um conversor em uma microrrede CA, os seguintes objetivos específicos deverão ser atendidos:

a) propor um controle do conversor formador de rede que garanta tensão constante no barramento de alimentação da microrrede ilhada;
b) desenvolver o controle do conversor formador de rede como uma fonte de corrente controlada, que garanta sua operação no modo conectada à rede;
c) descrever o controle que garanta a operação adequada no modo ilhado e conectado à rede principal;
d) analisar o controle do conversor formador de rede por meio de simulação no *software* Matlab/Simulink;
e) apresentar o modelo da microrrede ilhada e conectada à rede com controle centralizado.

1.3 METOLOGIA

Este trabalho busca simular um conversor formador de rede conectado a uma microrrede de energia elétrica no modo ilhado e conetado a rede. Em relação aos objetivos, avaliar e investigar o conversor formador de rede em uma microrrede CA. Os procedimentos técnicos usados foram a pesquisa bibliográfica, como intuito de estudo. E finalmente, o trabalho é abordado de forma explícita.

O primeiro intuito é a realização do estudo aprofundado para melhor entendimento teórico e prático do projeto, além da revisão bibliográfica dos assuntos que serão abordados, como geração distribuída, microrrede, microfontes, conversor formador de rede e supridor de rede. Com o embasamento finalizado, propor um controle do conversor formador de rede que garanta tensão e frequência constantes no barramento de alimentação da microrrede com controle centralizado e uma operação adequada no modo ilhado.

Em seguida, aprimorar os conhecimentos no Matlab/Simulink para, assim, examinar o controle do conversor formador de rede por meio de simulações e análises no *software*.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

A seção 1 apresenta uma introdução sobre geração distribuída, como ela vem sendo abordada no país e seus benefícios. Assim como um novo conceito ao setor elétrico, a microrrede.

Na seção 2 é apresentada uma revisão bibliográfica sobre microrredes de energia elétrica, seus

modos de operação, tipos de microfontes, controle e os conversores supridor de rede e formador de rede.

Na terceira e última seção são apresentados os resultados referentes a simulação do conversor formador de rede conectado a uma microrrede, com apresentação de estudo de caso do sistema. E por fim, as conclusões do trabalho.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

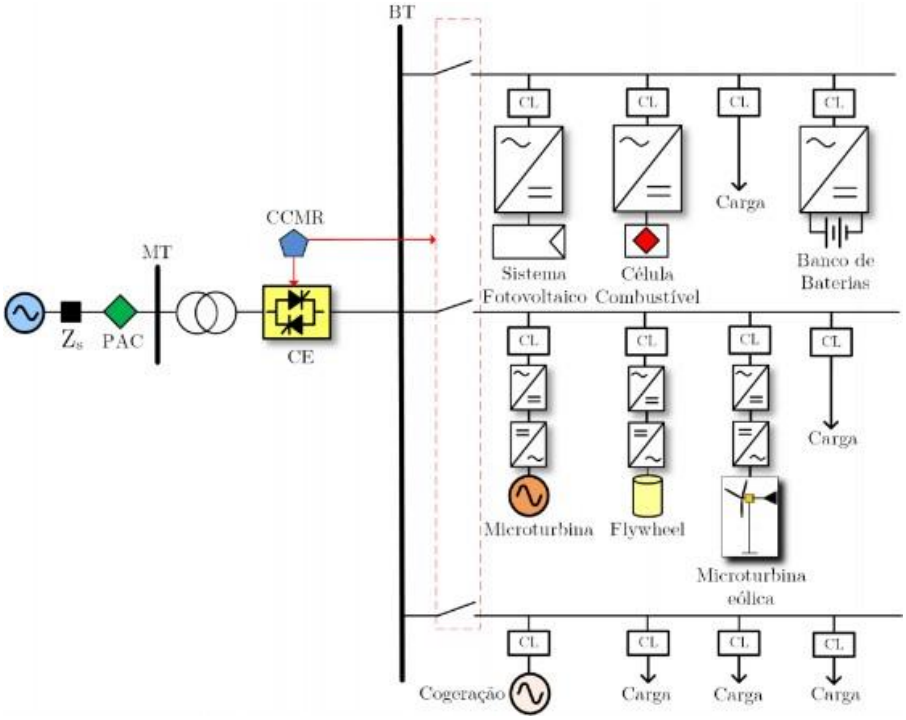
Para o referencial teórico deste projeto, realizou-se uma revisão de trabalhos existentes sobre o tema abordado. Além de documentos oficiais, foram realizadas pesquisas eletrônicas de artigos e revistas *on-line*. Para se ter uma compreensão sobre microrredes, assunto que será abordado neste trabalho, foi necessária uma ampla pesquisa sobre o tema.

2.1 MICRORREDE

A MR pode ser entendida como uma rede autônoma em baixa ou média tensão,controlável, com GD e capaz de armazenar energia operando conectada ao sistema elétrico de potência ou desconectada desse sistema (LASSETER, 2001).

Na Figura 1 é apresentada a arquitetura básica de uma microrrede em corrente alternada (CA). O sistema elétrico ilustrado é composto por três alimentadores radiais conectados à rede elétrica principal em BT. Para a rede, o ponto de acoplamento comum (PAC) está localizado no lado de MT, sendo possível, também, encontrar o mesmo no lado de BT.

Figura 1 – Típica configuração de uma microrrede.



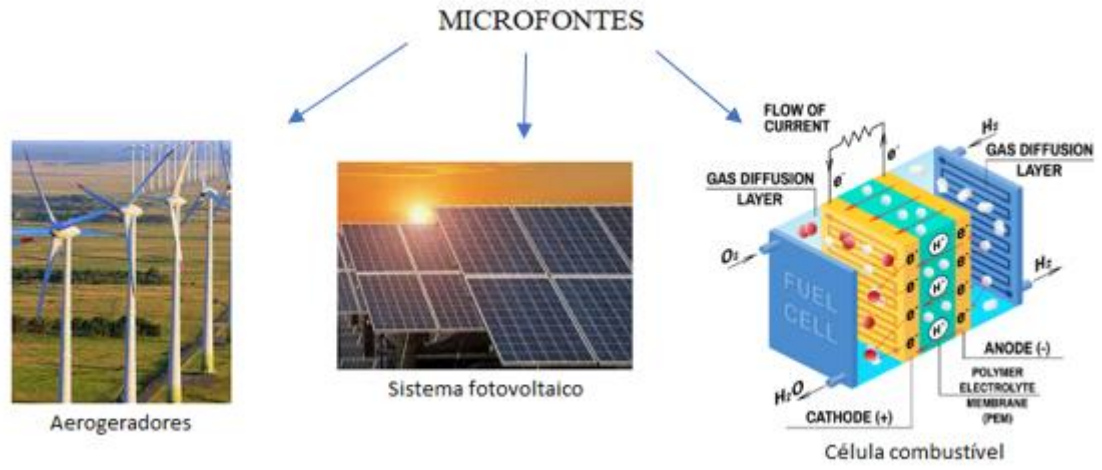
Fonte: EID e outros (2014).

2.1.1 Microfontes

As microfontes (MFs) que integram uma microrrede são pequenas unidades geradoras de centenas de kW. Usualmente essas MFs são módulos fotovoltaicos, microturbinas a gás, células a combustível e geradores eólicos, incluindo, também, as microcentrais hidrelétricas. EssasMFs detêm aspectos ligados à GD como baixo custo, pequeno tempo de instalação, baixa tensão e redução na emissão de gases poluentes.

As MFs são fontes para produção de energia elétrica e estão localizadas próximas ao local de uso exibindo uma faixa de potência entre 1kW a 10 MW (BHENDE; KALAM,2013; BALANUTA; VECHIU; GURGUIATU, 2012) e (SINGER et al., 2010). Essas MFs de geração distribuída são capazes de receber alimentação a partir de combustíveis fósseis ou fontes de energia renováveis (KROPOSKI et al., 2008). As fontes renováveis são fundamentais para o desenvolvimento das microrredes, pois em muitas localidades é possível explorar o potencial de tais fontes para uma produção de energia elétrica com alta eficiência (CHEN; GOOI; WANG, 2012) e (HE et al.,2013). A Figura 2 destaca as principais microfontes utilizadas em uma microrrede (LOPES; MADUREIRA; MOREIRA, 2013).

Figura 2 – Microfontes de geração distribuída.



Fonte: Própria autora.

2.1.2 Controle da Microrrede

O controle da microrrede precisa assegurar que todas as suas funções sejam realizadas. Na literatura existem diversas definições para os níveis de controle, mas uma classificação muito comum divide-se nos seguintes níveis (EID et al., 2014) e (SAHOO; SINHA; KISHORE, 2017):

- controle primário: Controlador Local (CL);
- controle secundário: Controlador Central da Microrrede (CCMR);
- controle terciário: Operador da Rede de Distribuição (ORD) ou Operador de Mercado (OM).

2.2 MODOS DE OPERAÇÃO

Uma MR pode operar em quatro modos, segundo o padrão IEEE Std 1547.4 (IEEE, 2011): modo conectado à rede elétrica principal, transição para o modo ilhado, modo ilhadoou isolado, modo de reconexão da microrrede.

2.2.1 Modo Ilhado

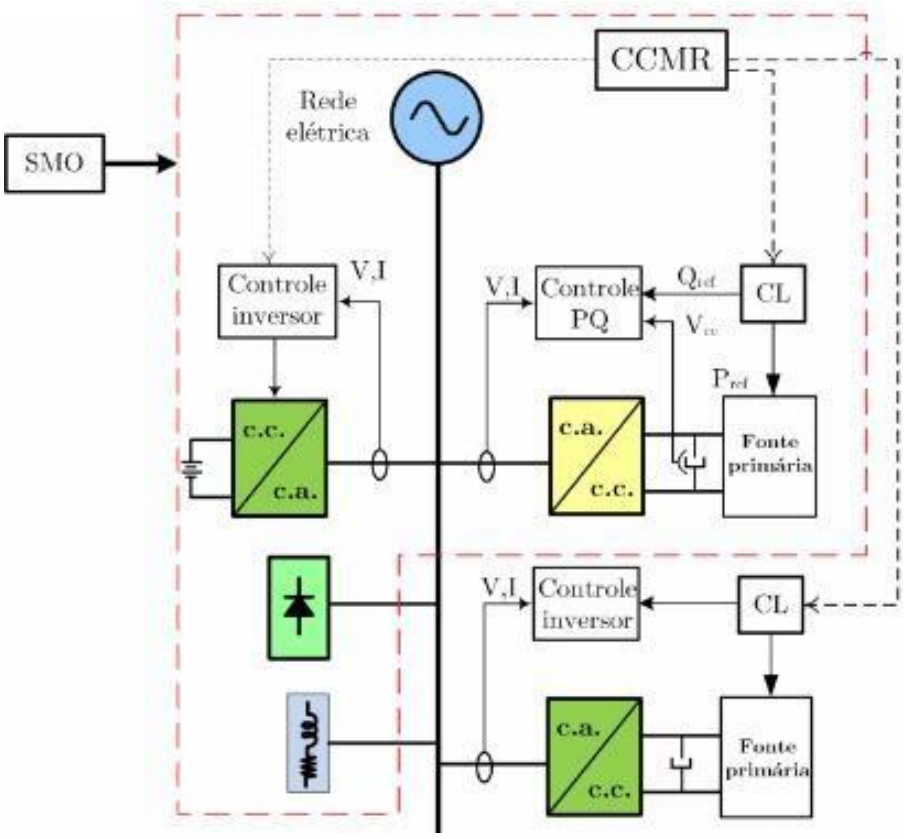
Na operação em modo ilhado ou isolado, para manter a continuidade de tensão e frequência na microrrede, um inversor eletrônico associado a um sistema de armazenamento opera no modo V-f e deve ser acoplado, garantindo a operação como uma fonte controlada de tensão (HOJO et al., 2008).

A MR pode operar no modo SMO (single-masteroperation) ou MMO (multi-masteroperation) (LOPES; MOREIRA; RESENDE, 2005a). A Figura 3 apresenta o controle SMO em conjunto com o controle MMO.

No modo SMO os conversores efetuam em uma configuração mestre-escravo, em que um conversor opera no modo V-f e os demais no modo PQ. Uma MR com controle SMO trabalha em uma arquitetura centralizada, na qual o CCMR traça as decisões de controle sobretodos os conversores e requer de um canal de comunicação (BRANDÃO, 2015) e (MONICA;

KOWSALYA, 2016).

Figura 3 – Controle MMO, com modo SMO integrado.



Fonte: Lopes, Moreira e Madureira (2006).

No modo MMO, os diversos conversores operam como mestre, por meio do controle por *droop* com operação semelhante à de um gerador síncrono em sistemas convencionais de energia, com seus reguladores de tensão e velocidade (LOPES; MOREIRA; RESENDE, 2005).

A arquitetura da configuração MMO é descentralizada, considerando a não obrigatoriedade de um canal de comunicação com o CCMR, pois os conversores são responsáveis pelos valores de tensão e frequência no PAC da MR.

Um controle de demanda deve possibilitar que as cargas selecionadas sejam mantidas em operação, quando a geração de energia elétrica em modo ilhado não for suficiente para atender a todas as cargas (RESE; COSTA; SILVA, 2012).

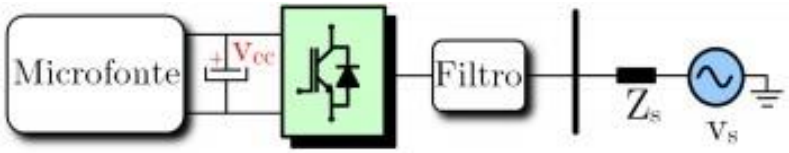
2.3 CONVERSORES

Para o melhor aproveitamento das vantagens propiciadas por uma MR, é preciso que conversores eletrônicos sejam interligados a diversos tipos de fontes geradoras, cargas e elementos de armazenamento (BOROYEVICH et al., 2010). Na literatura, encontramos três categorias de conversores (ROCABERT et al., 2012) e (MAJUMDER; BAG, 2014): supridor de rede, suporte à rede e formador de rede.

2.3.1 Conversor Supridor de Rede

O conversor supridor de rede tem como funcionalidade converter a energia produzida por alguma microfonte de energia, a fim de entregá-la à rede elétrica (ROCABERT, 2012). Este conversor é visto pela rede CA como uma fonte de corrente controlada, com alta impedância de entrada, e opera injetando potência ativa na rede a partir da sincronização com a mesma. A Figura 4 ilustra uma típica configuração de conversor supridor de rede.

Figura 4– Configuração do conversor supridor de rede.



Fonte: Antunes (2018).

2.3.2 Conversor Suporte à Rede

Por meio do controle de potência ativa e reativa produzida ou absorvida na saída do conversor, através da regulação de tensão e frequência, o conversor de suporte à rede exerce sua função de fornecer serviços auxiliares à microrrede (ANTUNES, 2018). De acordo com a topologia e controle do conversor, o suporte à rede tem as funcionalidades que um supridor e um formador de rede requerem (E. V. FILHO, 2015).

Em relação aos seus modos de operação, o conversor de suporte à rede apresenta duas formas, como uma fonte de tensão com uma pequena impedância em série e por meio de operação como fonte de corrente (FC) com impedância de saída alta (ROCABERT, 2012).

No modo de operação como fonte de tensão, o suporte à rede consegue exercer a função do formador de rede, não dependendo da presença do mesmo na microrrede. Todavia, quando operado como FC, a MR requer um formador de rede para gerar uma referência de tensão (ROCABERT, 2012).

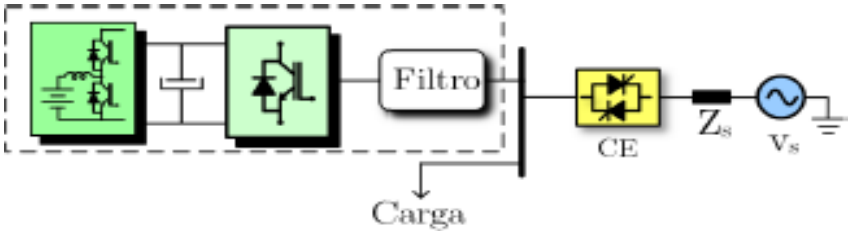
2.3.3 Conversor Formador de Rede

O conversor formador de rede cria uma rede de corrente alternada (CA), a partir do banco de baterias, no qual podem ser inseridas cargas e unidades de geração: solar, eólica e pequenas centrais hidrelétricas. A microrrede com controle centralizado é gerenciada pelo inversor formador de rede, motivo pelo qual recebe esta designação (COSTA, 2018).

O banco de baterias é um componente essencial em MRs isoladas que utilizam inversores formadores de rede, pois é a partir dele que a rede em corrente alternada é formada. Além disso, as baterias são utilizadas na função de *backup* de energia quando a disponibilidade de recurso energético for insuficiente para atender as cargas (COSTA, 2018).

A Figura 5 apresenta uma configuração básica de um conversor formador de rede, com conexão em uma MR com rede elétrica e carga.

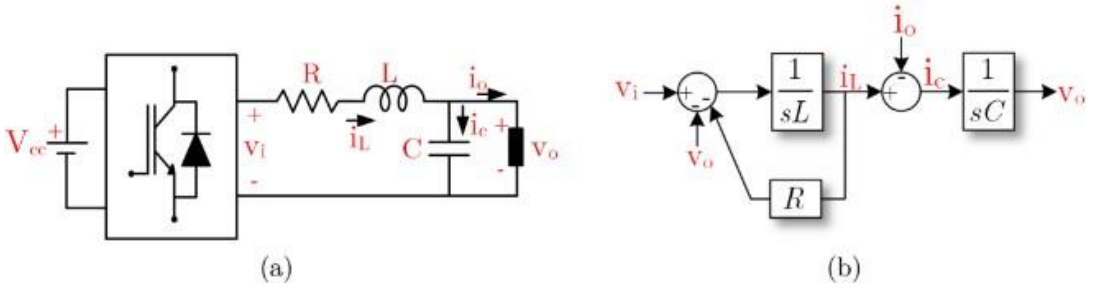
Figura 5 – Esquema básico de um formador de rede.



Fonte: Antunes (2018).

A configuração de um formador de rede é representada na Figura 5, sendo composta por um VSI trifásico, com filtro passivo do tipo LC, que faz com que uma tensão senoidal seja garantida em sua saída. Já a Figura 6(a) destaca um VSI monofásico com um filtro LC. Em contrapartida na Figura 6b é apresentado o diagrama de blocos do filtro LC.

Figura 6 – Inversor monofásico em ponte H: (a) inversor com filtro LC; (b) diagrama de blocos do filtro LC.



Fonte: Antunes (2018).

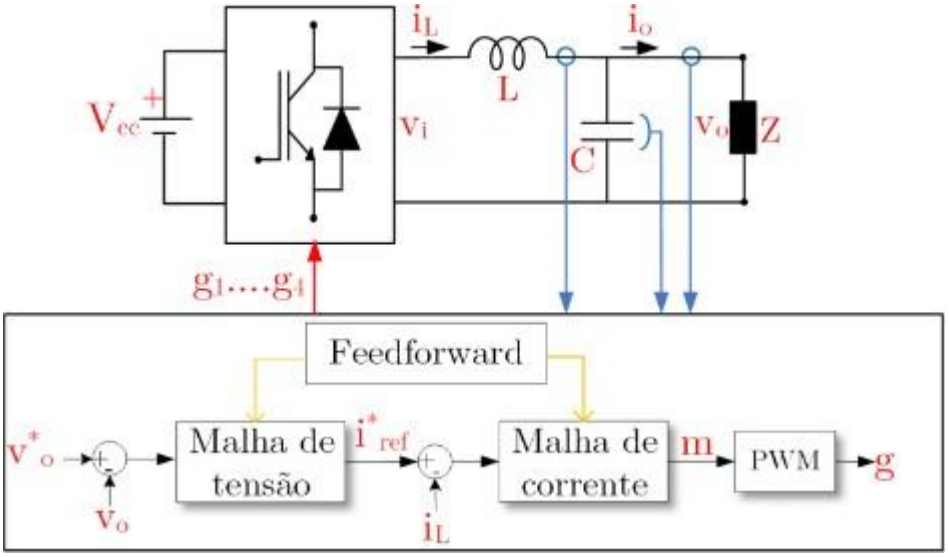
2.3.3.1 Controle do Conversor Formador de Rede

A Figura 7 apresenta o diagrama de controle que se aplica na operação de conversores formadores de rede operando no modo ilhado. Em malha fechada, o VSI opera para que o controlador de tensão gere uma referência para a malha de corrente que é mais rápida.

O sistema de controle da Figura 7 é conhecido como múltiplas malhas (*multi-loopcontrol*) compondo o controle do formador de rede por malha de tensão e corrente (MA et al., 2015). O controle em malha simples (*single loop control*) (AAMIR; KALWAR; MEKHILEF, 2016) também garante o controle da tensão de saída do formador de rede quando é usado apenas uma malha de tensão. Entretanto, essa configuração não garante a proteção contra curto-circuito na saída do inversor, além da necessidade de uma técnica de amortecimento do tipo ativa ou passiva, para eliminar a amplificação harmônica no filtro LC (CHO et al., 2017).

Para a operação no modo conectado à rede, a malha de tensão do fomador de rede ilustrada na Figura 7, é desativada e passa a receber uma referência de corrente. Desse modo, o conversor tem duas opções de operação: (i) atuação como suporte à rede provendo serviços ancilares na rede elétrica; (ii) operar sincronizado com a rede, aguardando a sua atuação na transição para o modo ilhado.

Figura 7 – Diagrama de controle do formador de rede monofásico.



Fonte: Antunes (2018).

2.3 Conclusões Sobre o Referencial Teórico

Após a revisão do referencial teórico, compreende-se a funcionalidade de uma MR, as microfontes que a compõem, como o controle possibilita que as funções da MR sejam cumpridas, os modos de operação conectado à rede e modo ilhado e os tipos de conversores que integram uma MR. A partir disso, é possivel estudar a MR em análise e entender os resultados gerados com a simulação.

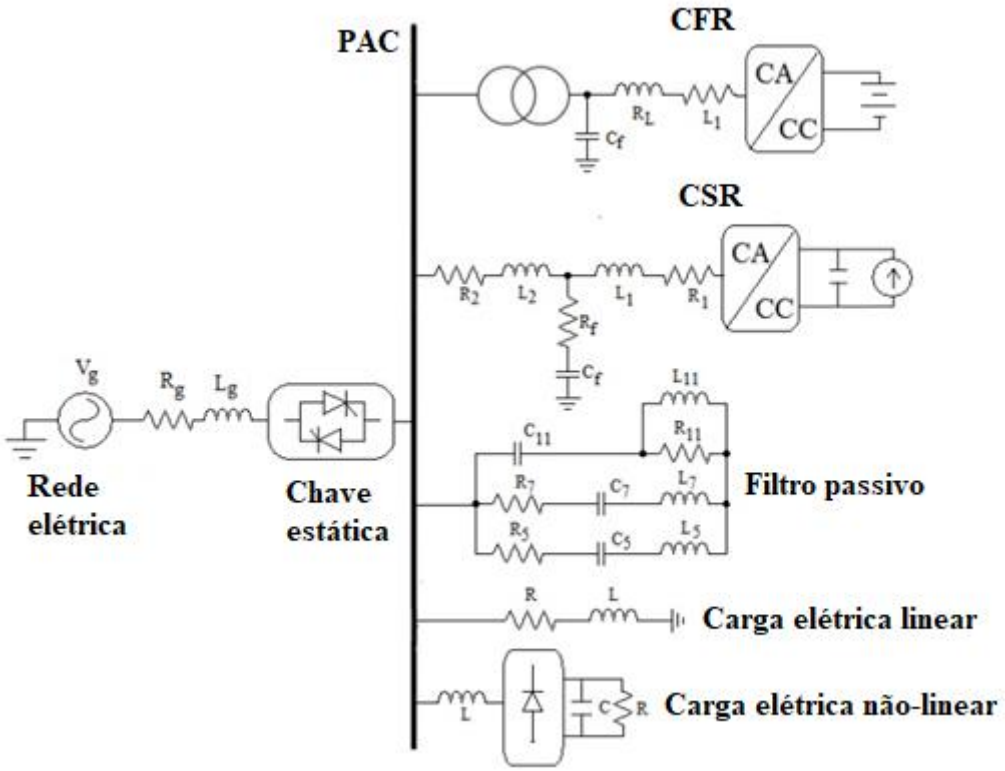
3. ESTUDO DA MICRORREDE DE ENERGIA ELÉTRICA

Neste capítulo, é apresentada a configuração da MR em análise, suas características elétricas, a carga elétrica, o filtro passivo, os conversores formador de rede e supridor de rede, como também, os resultados obtidos por simulação da MR em modo ilhado e conectado à rede.

3.1 MICRORREDE EM ANÁLISE

A microrrede analisada neste trabalho é representada na Figura 8 por meio de um diagrama de fases.

Figura 8 – Configuração da microrrede analisada no trabalho.



Fonte: Antunes (2018).

A fonte de GD da MR é formada por um CSR com capacidade de alimentar as cargas elétricas da MR. Existe também um CFR com capacidade para armazenar a energia gerada pelo CSR, bem como prestar assistência ao sistema em caso de funcionamento isolado da rede elétrica principal. A microrrede também possui uma chave estática (SS-MR) que permite tanto a operação autônoma quanto conectada à rede elétrica principal. A carga elétrica do microrrede é do tipo linear e não-linear. Devido à natureza não-linear da carga elétrica, um filtro passivo com três estágios de filtragem é usado para compensação harmônica. Cada elemento da simulação é construído na plataforma MATLAB/Simulink. Os parâmetros elétricos primários para a simulação da MR são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Características elétricas da microrrede analisada.

Sistemas	**Características**
CFR	Transformador isolador (Δ-Yg) 220/220V-75kVA, L1=20μH, R1=10mΩ, C1=550μF, fsw=15,36kHz, banco de baterias Vcc=500V
CSR	20kVA, 220V, fsw=7,68kHz, L1=1,5mH, L2=47μH, R1=R2=10mΩ, Rf=0,3Ω, C1=55μF, Cdc=9,4mF
Carga elétrica linear	220V, 35kVA, fp=0,73 atrasado
Carga elétrica não-linear	Retificador trifásico a diodos, 220V, 30kW, L=0,5mH, C=18,8mF, R=2,5Ω
Filtro passivo	P.alta: 5h, Q=42, L=2.7mH, C=105,25μF, 2kVA
	P.alta: 7h, Q=42, L=1.3mH, C=107,4μF, 2kVA
	P.alta: 11h, Q=2.2, L=0.535mH, C=108,73μF, 2kVA
Rede elétrica	220V, 60Hz, Scc=0,75MVA, X/R=0,5

3.1.1 Carga Elétrica da Microrrede

Uma impedância série RL do tipo constante pode ser usada para representar uma carga linear. A variação da tensão V_L na carga em função da corrente I_L pode ser descrita usando a Equação 1 (KANELLO, 2005).

$$v_L(t) = Ri_L(t) + L\frac{di_L(t)}{dt} \tag{1}$$

A carga não-linear é composta de componentes passivos e dispositivos semicondutores. Um retificador trifásico a diodos com seis pulsos, com um barramento CC do tipo fonte de tensão conectado a uma carga resistiva é utilizado para representar o modelo de uma carga não linear.

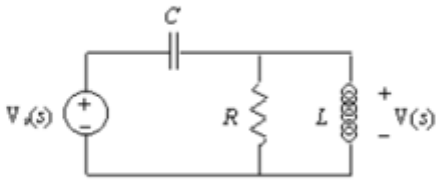
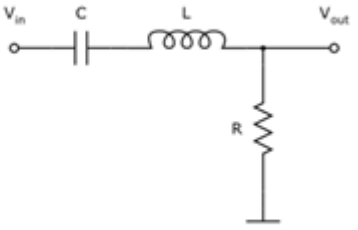
3.1.2 Filtro Passivo

O uso de filtros passivos pode fornecer um método de prevenção da contaminação harmônica do sistema elétrico (AKAGI, 2005). Essa estrutura é composta por uma série de resistores, indutores e capacitores que geralmente são conectados em paralelo com a carga para fornecer um caminho com baixa impedância para que as correntes harmônicas fluam em uma determinada frequência. Outra função deste componente é a correção do fator de potência, pois sua impedância na frequência fundamental é do tipo capacitiva (YOUSIF, 2004).

Os filtros passivos podem ser do tipo passa-faixa, passa-alta, ou compostos. Os filtros compostos são configurados por diversas etapas de filtragem. Conforme mostrado na Figura 9, existem configurações típicas de filtros com suas impedâncias específicas dependendo da frequência elétrica (DAS, 2003).

Para obter os parâmetros de um filtro de passagem, são utilizadas as Equações 2 a 5. No que diz respeito ao dimensionamento do filtro passa-alta, assume-se que na frequência fundamental, toda a corrente flui através do filtro LC, sendo a corrente no resistor desprezível. Desta forma, todos os parâmetros do filtro podem ser determinados usando as Equações 2 a 4 e 6 (DAS, 2003).

Figura 9 – Configurações de filtros passivos.

Tipo de filtro	Passa-Alta	Passa-Faixa
Configuração		

Fonte: Própria autora.

$$wxL_h - \frac{1}{wxC_h} = \frac{V_{ef}^2}{Q_{comp}} \tag{2}$$

$$h^2 = \frac{L_h}{C_h} \tag{3}$$

$$f_h = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_h C_h}} \tag{4}$$

$$Q_{FPB} = \frac{X_h}{R_h} \tag{5}$$

$$Q_{FPA} = \frac{R_h}{\sqrt{\frac{L_h}{C_h}}} \tag{6}$$

Em que:
w – frequência elétrica angular fundamental;

L_h e C_h – indutância e capacitância do filtro sintonizado no harmônico de ordem h;

V_{ef} e Q_{comp} – tensão de linha eficaz e potência reativa trifásica compensada na frequência fundamental;

f_h – frequência de ressonância do filtro passa-baixa;

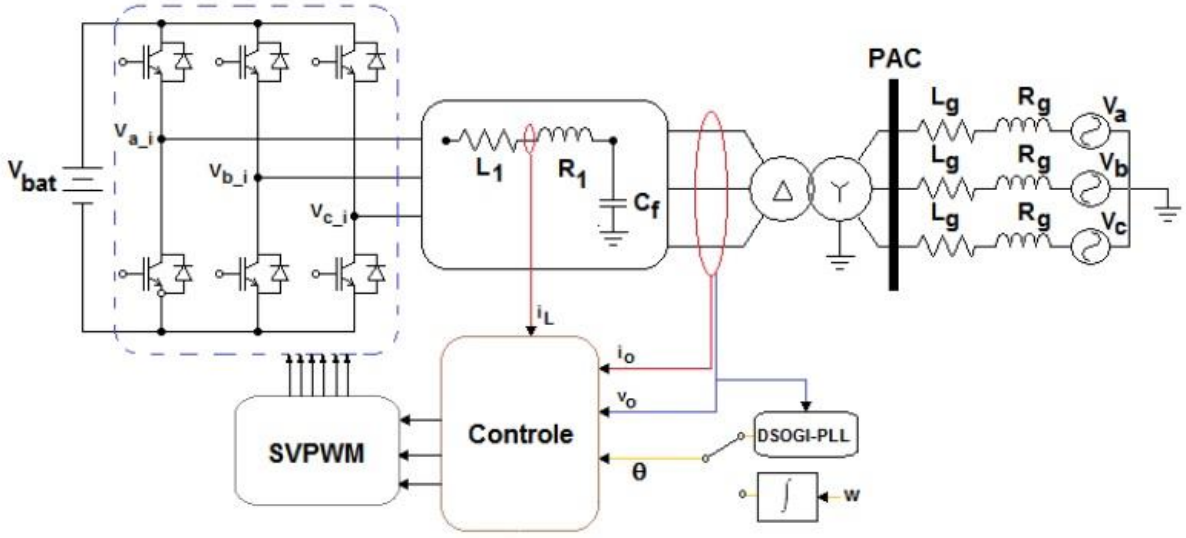
QFPB, QFPa X_h, R_h – fator de qualidade do filtro passa-baixa, fator de qualidade do filtro passa-alta, reatância indutiva ou capacitiva na frequência de ressonância e resistência do filtro passa-baixa/passa-alta.

3.1.3 Conversor Formador de Rede

O conversor de rede (CFR) utilizado na MR é composto por um inversor trifásico com dois níveis, e sua modulação *Space Vector PWM* (SVPWM) é realizada por injeção de sequência zero (HAVA, 1999). Existe um banco de baterias no CFR que pode operar a MR tanto ilhada quanto quando conectada à rede principal (XU, 2012). Em relação à transformação unitária, o isolamento galvânico também é fornecido por um transformador usado no CFR. Um circuito equivalente do CFR conectado a uma rede elétrica é mostrado na Figura 10 (XU, 2012; KANELLOS, 2005; MATOS, 2014).

O filtro LC para o CFR destina-se a ter uma frequência de corte igual a (1/10) a frequência de chaveamento do inversor. É possível obter uma boa característica de filtragem utilizando um banco de capacitores de filtro LC com capacidades de reatividade entre 10% e 15% da potência nominal CFR (SILVA, 2002).

Figura 10 – Circuito equivalente do CFR conectado à rede elétrica.



Fonte: (XU, 2012), (KANELLOS, 2005), (MATOS, 2014).

Para o controle do CFR é adotado um sistema em coordenadas dq, onde um controlador do tipo proporcional integral é utilizado nas malhas de tensão e corrente. As equações 7 a 10 são obtidas aplicando as leis de Kirchoff de tensão e corrente na saída do CFR e no filtro LC, respectivamente. A planta de filtro LC mostrada na Figura 11 foi obtida usando as equações a seguir.

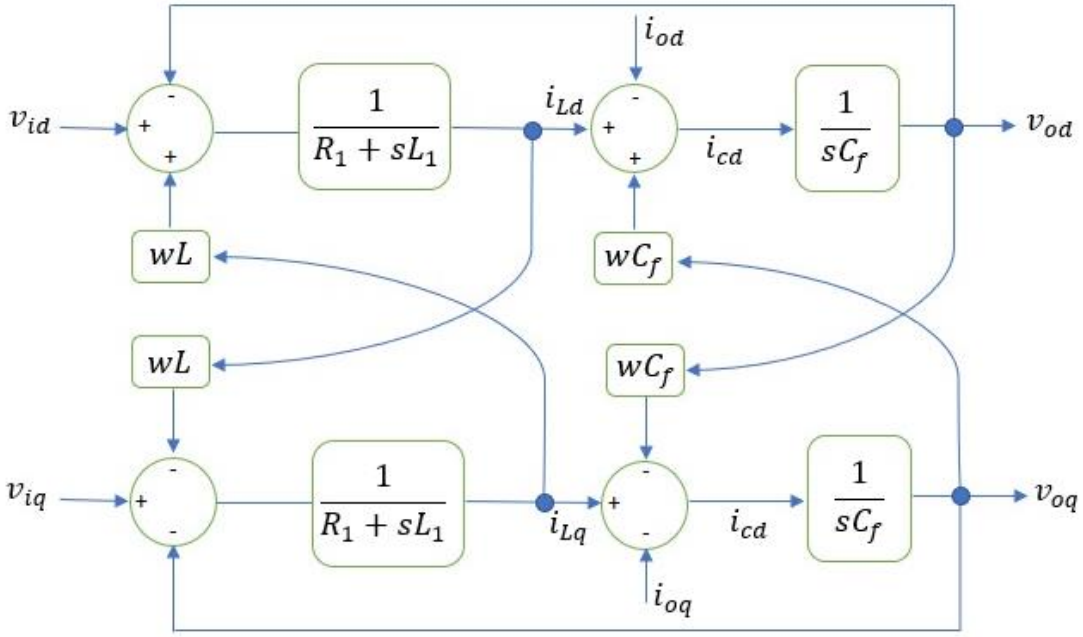
$$v_{id} = Ri_{Ld} - wLi_{Lq} + L\frac{di_{Ld}}{dt} + v_{od} \tag{7}$$

$$v_{iq} = Ri_{Lq} - wLi_{Ld} + L\frac{di_{Lq}}{dt} + v_{oq} \tag{8}$$

$$-wC_f v_{oq} + C_f\frac{dv_{od}}{dt} = i_{Ld} - i_{od} \tag{9}$$

$$wC_f v_{od} + C_f\frac{dv_{oq}}{dt} = i_{Lq} - i_{oq} \tag{10}$$

Figura 11 – Diagrama de blocos para a planta do filtro LC.



Fonte: Prória autora.

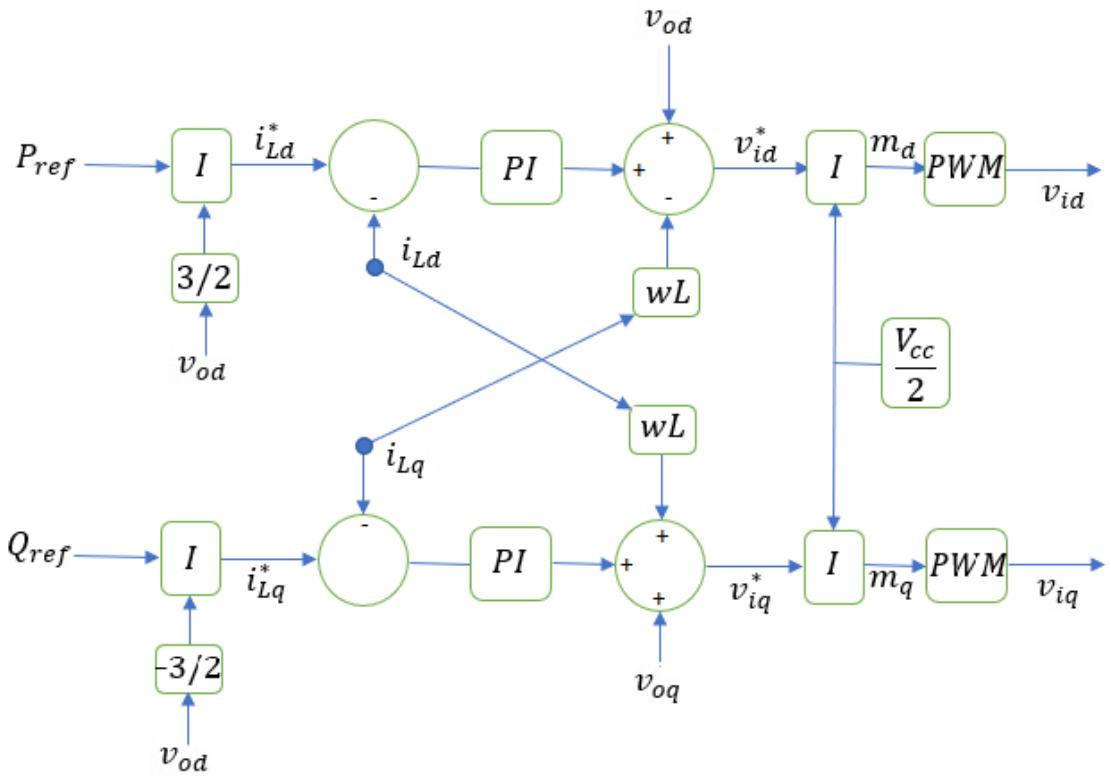
A partir do diagrama de blocos do filtro LC na Figura 11, é possível ver que existem diferenças entre a tensão no capacitor (v_o) e a corrente na carga (i_o). Há também um acoplamento cruzado entre os termos wLi_d, wLi_q, wCv_d e wCv_q.

Quando a rede elétrica está presente, o CFR funciona como uma fonte de corrente, conforme mostrado no diagrama de controle da Figura 12 (XU, 2012). Uma PLL DSOGI é usada no modo conectado para calcular o ângulo de tensão da rede (RODRIGUEZ, 2006). Os ganhos do controlador PI para a malha de corrente são calculados utilizando as Equações 11 e 12, com frequência de corte (w_{c_i}) igual a (1/5) da frequência de chaveamento do CFR (SILVA, 1999; YAZDANI, 2010).

$$K_{p_i} = L_1 w_{c_i} \tag{11}$$

$$K_{i_i} = R_1 w_{c_i} \tag{12}$$

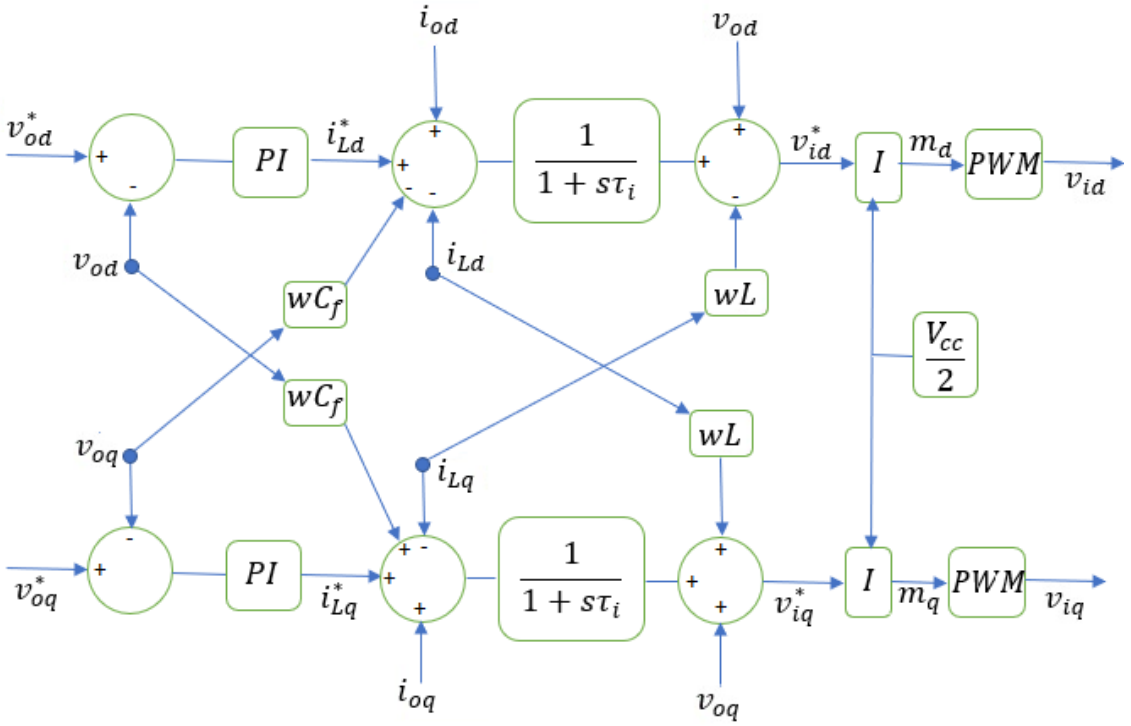
Figura 12 – Controle do inversor do CFR no modo fonte de corrente.



Fonte: Própria autora.

Quando o CFR opera independentemente da rede, ele controla a tensão e a frequência no PAC da MR, enquanto opera nos modos Vf (tensão-frequência) ou fonte de tensão. Nesta configuração, desconectado da rede, a PLL DSOGI é substituído por um oscilador que gera uma frequência elétrica angular com base em uma frequência de referência de 60 Hz. Todo o esquema de controle do CFR no modo Vf é mostrado na Figura 13 (MATOS, 2014). Utiliza uma malha de tensão em conjunto com uma malha de corrente, com um controlador PI em cada malha. Uma realimentação *feedforward* da corrente (i_o) e tensão (v_o) é realizada com desacoplamento dos termos convergentes (wL_1i_d, wL_1i_q , wC_fv_{od} e wC_fv_{oq}) (MATOS, 2014; SOLANKI, 2015). A malha de corrente é demonstrada por uma função de transferência de primeira ordem, com τ_i que é calculado usando a Equação 13.

Figura 13 – Controle do CFR no modo Vf .



Fonte: Própria autora.

A metodologia proposta por Yazdani (2010) define os ganhos do controlador PI para a malha de tensão. Primeiramente, é estabelecida uma margem de fase (m) entre 30 e 75 graus para a função de transferência em malha aberta. É possível calcular os ganhos de PI usando as Equações 14 e 15, considerando que a frequência de cruzamento (w_c) é proxima à frequência de corte. Os ganhos das malhas de tensão e corrente para o CFR são apresentados na Tabela 2.

$$\tau_i = \frac{1}{w_{c_i}} \tag{13}$$

$$K_{p_v} = C_f \sqrt{\frac{1}{\tau_i^2}\left(\frac{1 - sen\delta_m}{1 + sen\delta_m}\right)} \tag{14}$$

$$K_{i_v} = \frac{K_{p-v}}{\tau_i}\left(\frac{1 - sen\delta_m}{1 + sen\delta_m}\right) \tag{15}$$

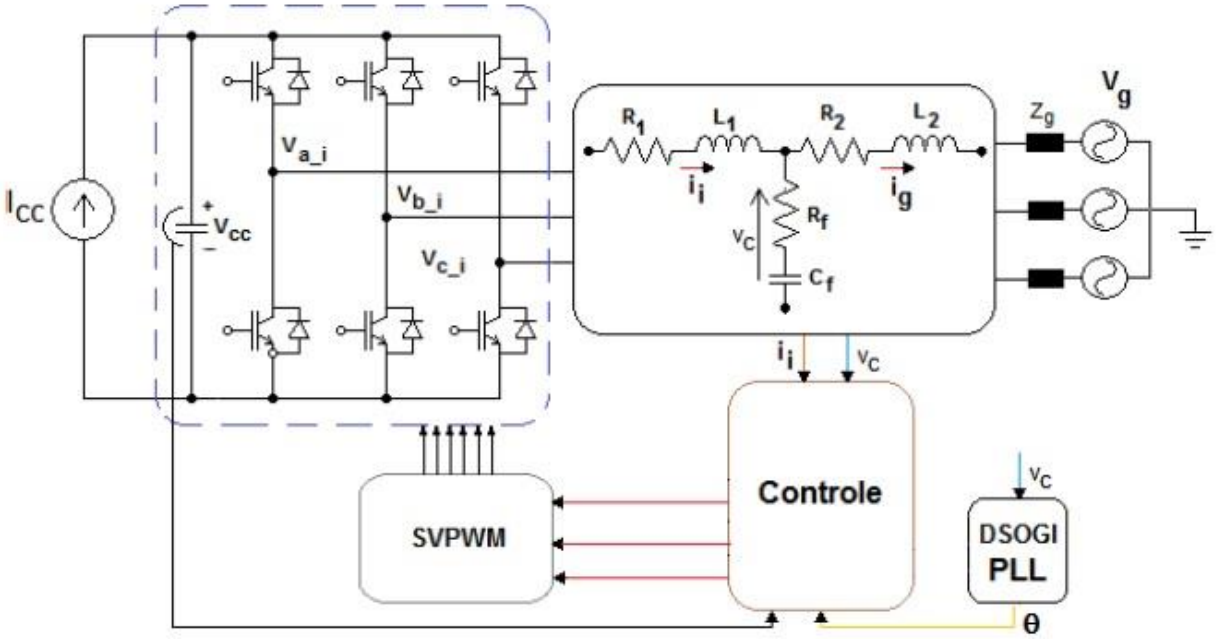
Tabela 2 – Ganho dos controladores das malhas do CFR.

Malha	Ganho
Tensão	K_p=1,87Ω^{-1} K_i=1125,1Ω^{-1}
Corrente	K_p=0,37Ω K_i=193,02Ω

3.1.4 Conversor Supridor de Rede

O circuito do CSR é mostrado na Figura 14 e é composto por um inversor trifásico com dois níveis e modulação SVPWM. A fonte de corrente no lado cc do inversor representa a fonte primária de energia, que pode representar a intermitência na geração de um sistema fotovoltaico. O inversor de energia estática do CSR atua como fonte de corrente, injetando potência ativa na rede elétrica sem injeção de reativos. De acordo com Reznik et al. (2012), o filtro LCL do inversor é projetado considerando amortecimento do tipo passivo.

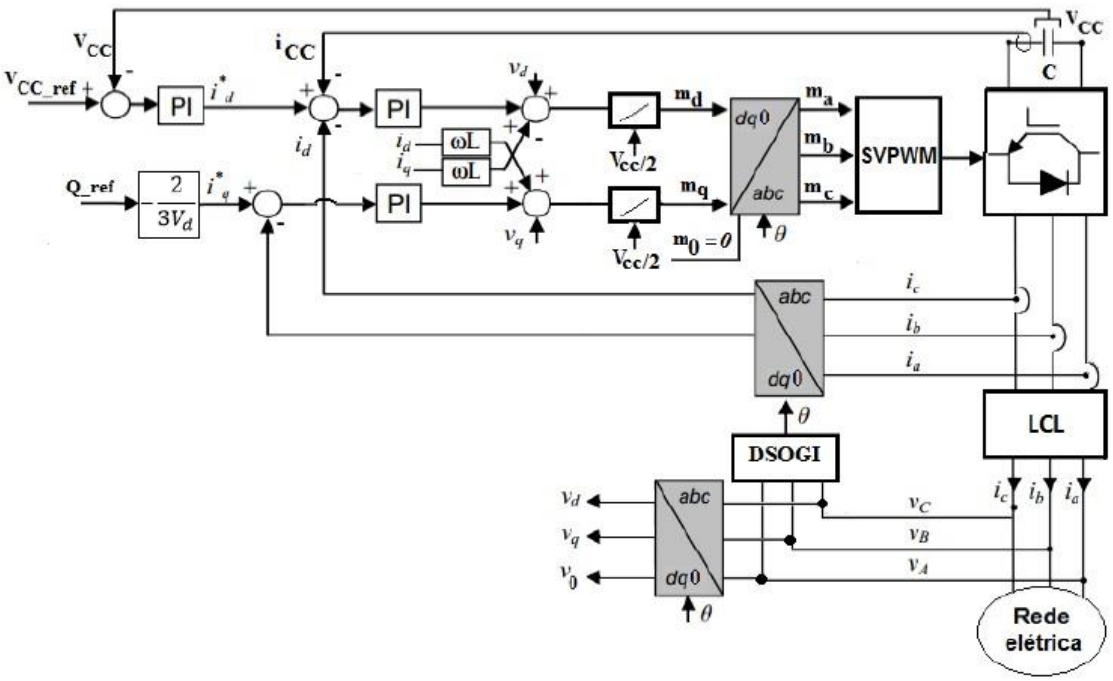
Figura 14 – Circuito equivalente do CSR conectado à rede elétrica.



Fonte: Antunes (2018).

O diagrama de controle para do CSR usando o sistema de coordenadas dq é mostrado na Figura 15 (VECHIU, 2011; CUPERTINO, 2012; RAHMAN, 2011).

Figura 15 – Diagrama de controle do CSR.



Fonte: VECHIU (2011).

É possível observar, pela Figura 15, que o controle do inversor é composto por uma malha de tensão no barramento cc, em cascata com a malha de corrente mais rápida e com controlador PI. Os ganhos da malha atual foram ajustados de forma semelhante ao CFR, mas com uma frequência de corte igual a 1/10 a frequência de chaveamento. Enquanto os ganhos do controlador da malha de tensão são calculados usando as Equações 16 e 17, com uma frequência de corte de 1/10 e 1/100 da frequência de corte da malha de corrente, respectivamente. Os ganhos das malhas de tensão e corrente do CSR são mostrados na Tabela 3.

$$K_{p_cc} = -\frac{4\pi v_{cc}(f_{c1} + f_{c2})c}{3v_d} \tag{16}$$

$$K_{i_cc} = -\frac{8\pi^2 v_{cc}(f_{c1} + f_{c2})c}{3v_d} \tag{17}$$

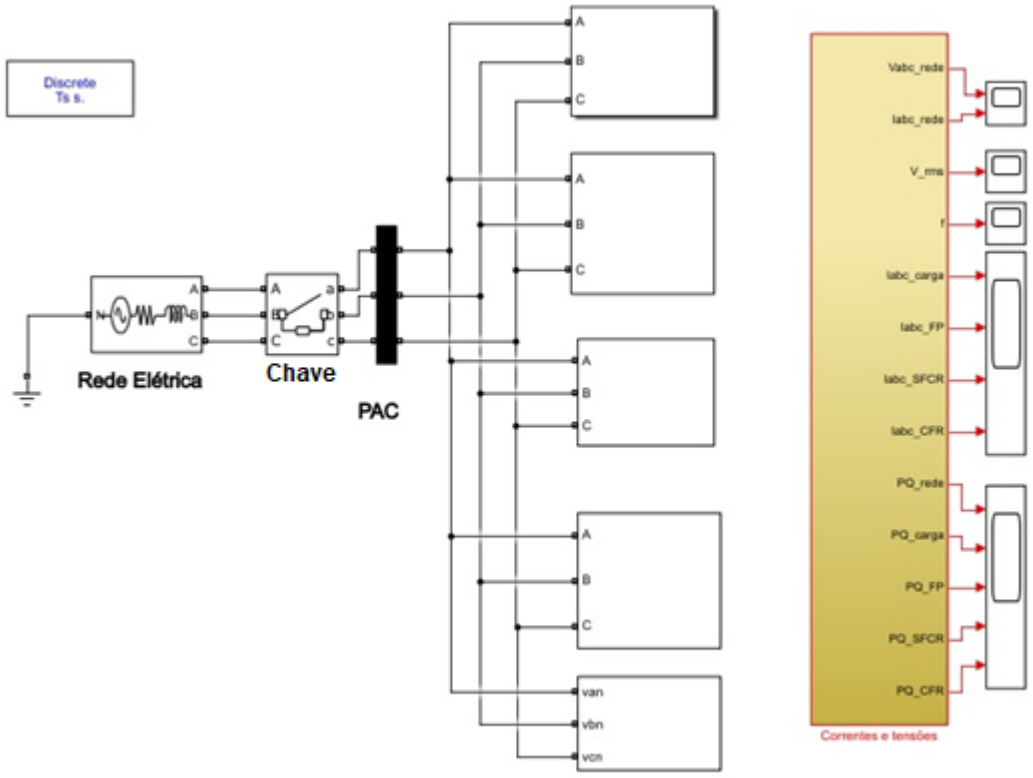
Tabela 3 – Ganho dos controladores do CSR.

Malha	Ganho
Tensão barramento c.c	K_p=-9,26Ω^{-1} K_i=-406,22Ω^{-1}
Corrente	K_p=7,05Ω K_i=48,25Ω

3.2 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

Todo o modelo da microrrede de energia elétrica foi desenvolvivo no Matlab/Simulink, e sua representação é ilustrada na Figura 16. Posteriormente são apresentados os principais resultados de simulação da microrrede.

Figura 16 – Modelo da microrrede de energia elétrica no Matlab/Simulink.



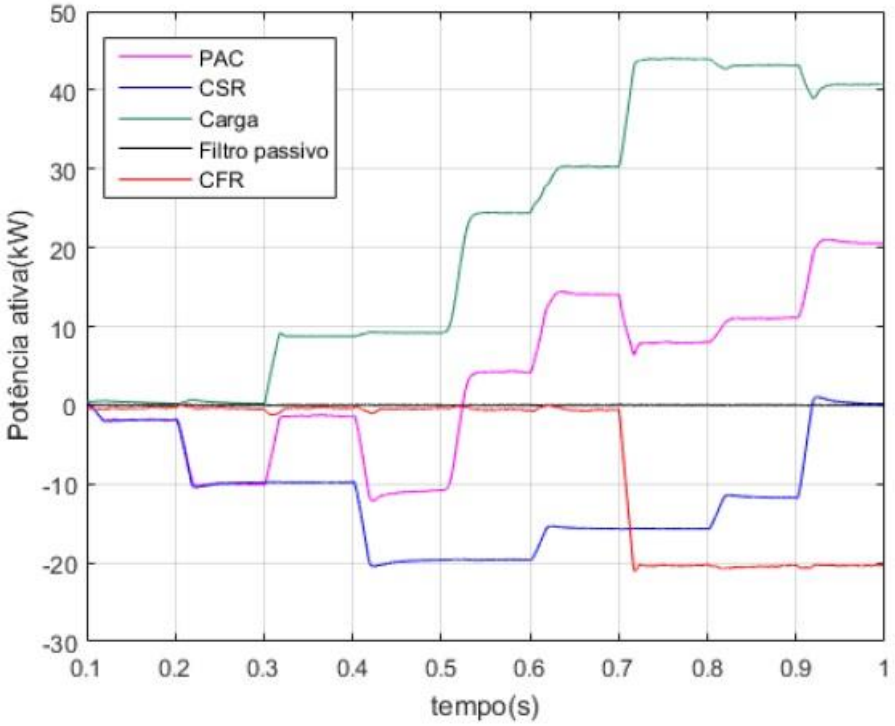
Fonte: Matlab/Simulink.

3.2.1 Operação conectado à rede elétrica

Tanto o CSR quanto o CFR operam quando a MR está conectado a uma rede elétrica como uma fonte de corrente controlada. A seguir é listada a ordem das conexões entre as cargas, fontes e outros componentes de microrredes que resultaram no fluxo de potência ativa e reativa mostrado nas Figura 17 e 18 no PAC, com um tempo de simulação igual a 1s.

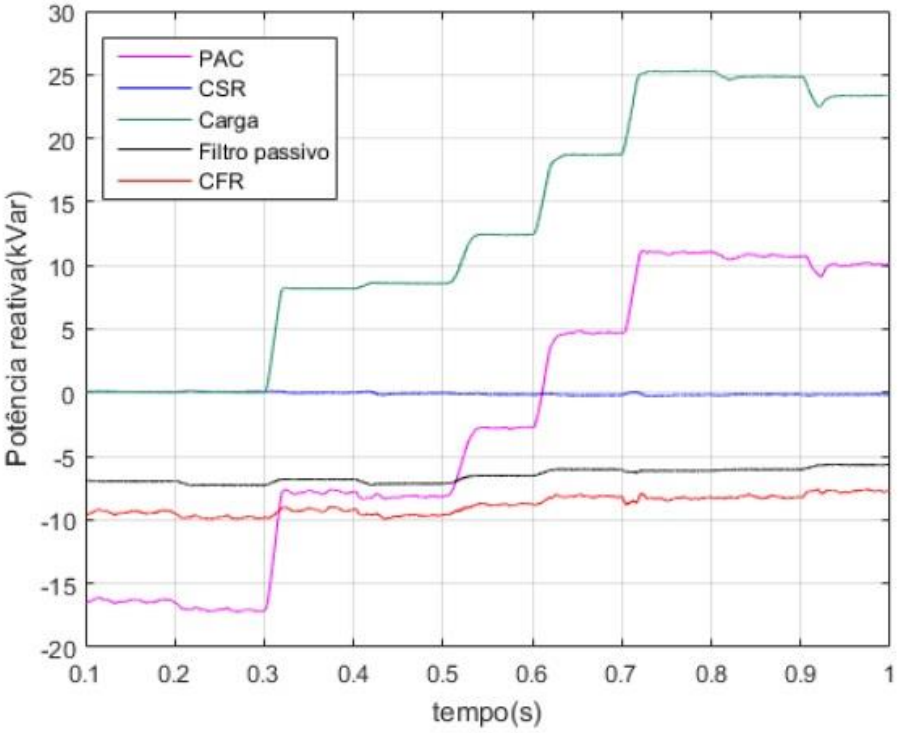
- t = 0s: conexão da rede elétrica, filtro passivo e o CFR operando como fonte de corrente;
- t = 0,1s: o CSR é conectado à rede e a fonte de corrente no seu barramento cc passa a injetar 4A;
- t = 0,2s: a fonte de corrente no CSR injeta 20A;
- t = 0,3s: conexão de carga RL com (13+ j12) kVA;
- t = 0,4s: a fonte cc do CSR é ajustada para 40A;
- t = 0,5s: conexão do retificador trifásico com R=5Ω;
- t = 0,6s: conexão de carga RL com (13+ j12) kVA e a fonte cc do CSR é ajustada para 32A;
- t = 0,7s: carga do retificador trifásico passa para R=2,5Ω e o CSR passa a injetar na rede 20 kW;
- t = 0,8s: a fonte cc do CSR é ajustada para 24A;
- t = 0,9s: a fonte cc do CSR é desligada;
- t = 1s: fim da simulação.

Figura 17 – Fluxo de potência ativa no PAC.



Fonte: Matlab/Simulink.

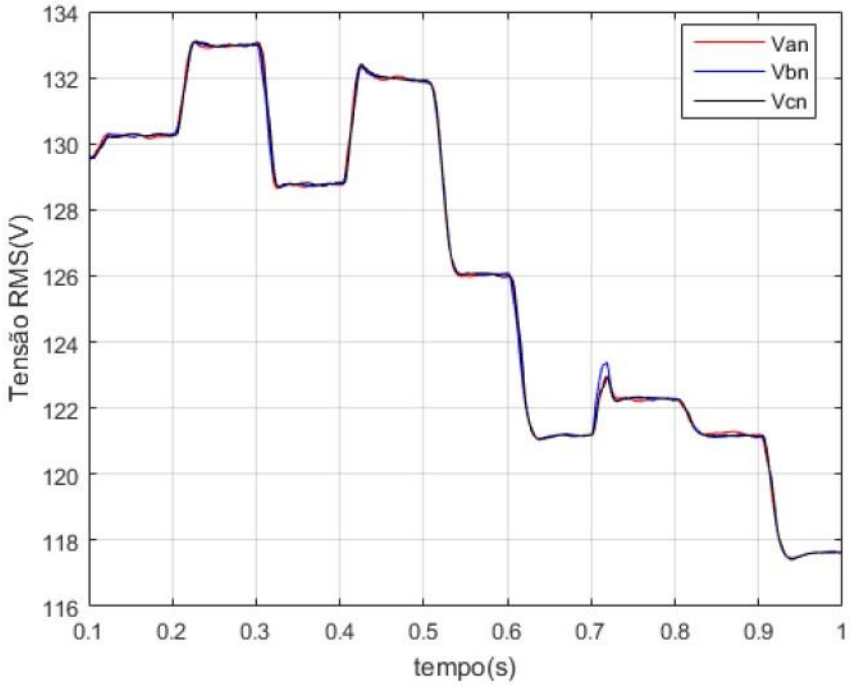
Figura 18 – Fluxo de potência reativa no PAC.



Fonte: Matlab/Simulink.

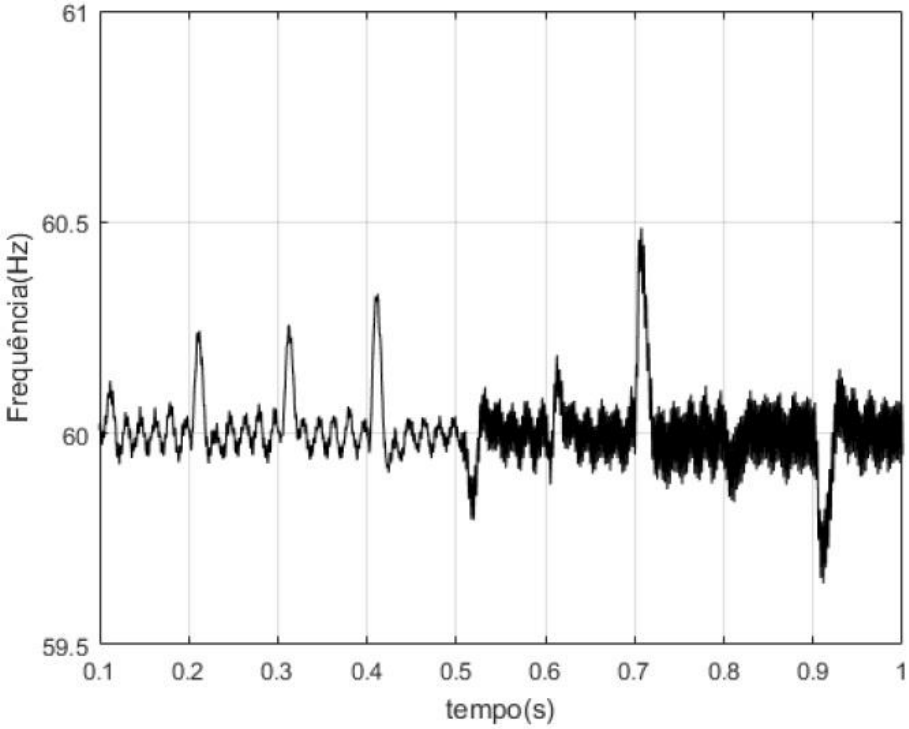
Os resultados das Figuras 17 e 18 permitem ver que o CSR variou a injeção de potência ativa na rede elétrica, com valor máximo próximo a 20kW. Outro ponto que merece destaque é que o CSR não auxilia na injeção de reativos. Enquanto o CFR suprimiu inicialmente as perdas Joule do transformador isolador pela injeção de potência ativa na rede. Em t=0,7s, o CFR passou a injetar 20kW de potência ativa na rede, auxiliando no controle da regulação da tensão da rede. Houve um aumento do fluxo de potência no PAC com a ligação das cargas elétricas, atingindo um valor de 20kW e 10kVar. O valor rms das tensões para cada fase no PAC do microrrede bem como a frequência é mostrado nas Figuras 19 e 20.

Figura 19 – Grandeza elétrica no PAC da microrrede: Tensão rms por fase.



Fonte: Matlab/Simulink.

Figura 20 – Grandeza elétrica no PAC da microrrede: Frequência elétrica.



Fonte: Matlab/Simulink.

Na figura 20 percebemos que a frequência atinge seu valor máximo em 0,7s. De acordo com a ANEEL (2015), para um barramento com tensão inferior a 1kV, a tensão de fase adequada deve estar entre 117V e 133V. A ANEEL especifica que a frequência elétrica deve estar entre 59,9 e 60,1Hz. Porém, em sistemas com geração, é possível elevar os limites de frequência para 59,5 a 60,5Hz por no máximo 30s. Como resultado, é possível observar nas Figura 19 e 20 que tanto a tensão quanto a frequência estão dentro dos limites estabelecidos pela ANEEL.

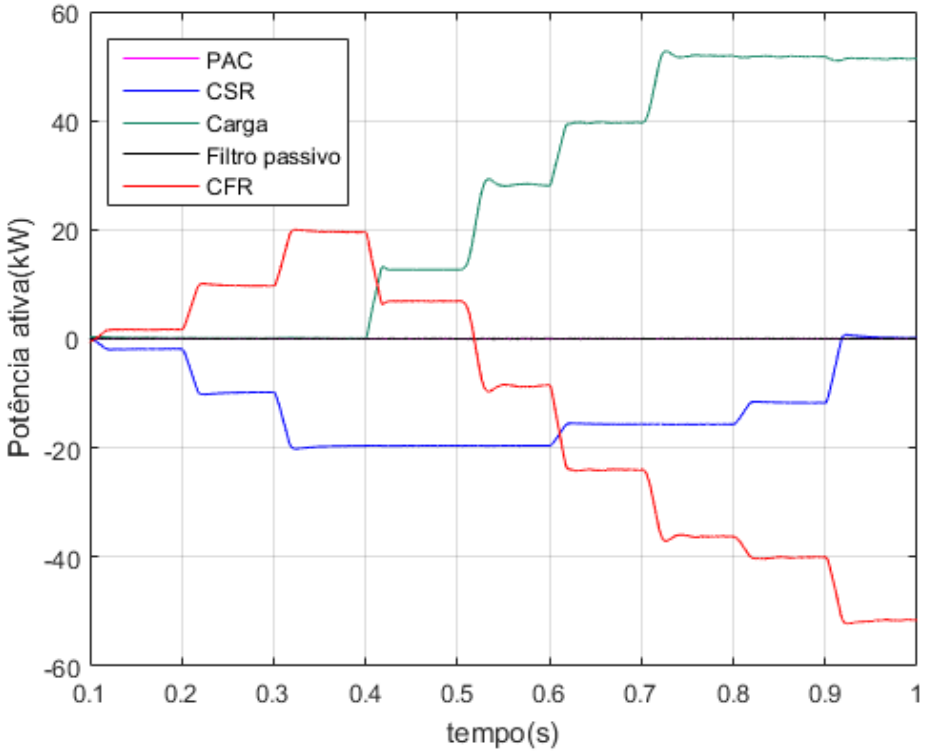
3.2.2 Operação em modo ilhado

Quando a microrrede opera no modo ilhado, a rede elétrica encontra-se desconectada com a abertura da chave estática (SS-MR) entre a rede elétrica e MR. As condições para tal operação são descritas a seguir.

- t=0s: início da simulação com *black start*, em que o CFR opera no modo V/f e o filtro passivo é conectado;
- t=0,1s: a fonte de corrente no CSR passa a injetar 4A;
- t=0,2s: a fonte de corrente no CSR injeta 20A;
- t=0,3s: a fonte cc do CSR é ajustada para 40A;
- t=0,4s: conexão de carga RL com (13+ j12) kVA;
- t=0,5s: conexão do retificador trifásico com R=5Ω;
- t=0,6s: conexão de carga RL com (13+ j12) kVA e a fonte cc. do CSR é ajustada para 32A;
- t=0,7s: conexão do retificador trifásico com R=5Ω;
- t=0,8s: a fonte cc do CSR é ajustada para 24A;
- t=0,9s: a fonte cc do CSR é desligada.
- t = 1s: fim da simulação.

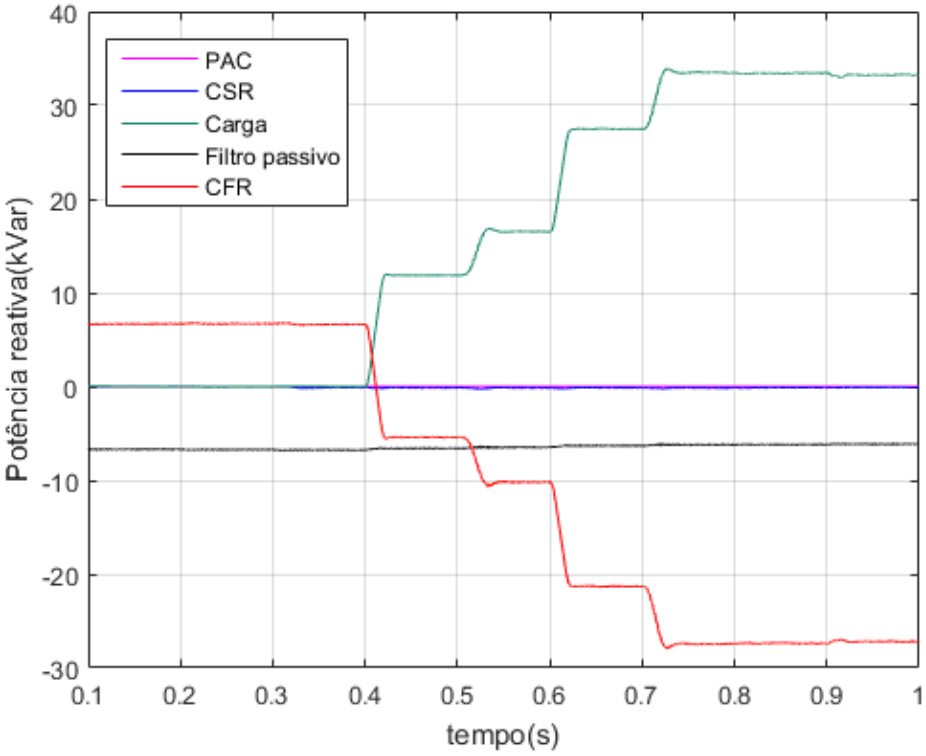
Com um período de simulação de um segundo, o fluxo de potência ativa e potência reativa são determinados pela operação da microrrede em modo ilhado nas Figuras 21 e 22.

Figura 21 – Fluxo de potência ativa na microrrede operando isolada.



Fonte: Matlab/Simulink.

Figura 22 – Fluxo de potência reativa na microrrede operando isolada.

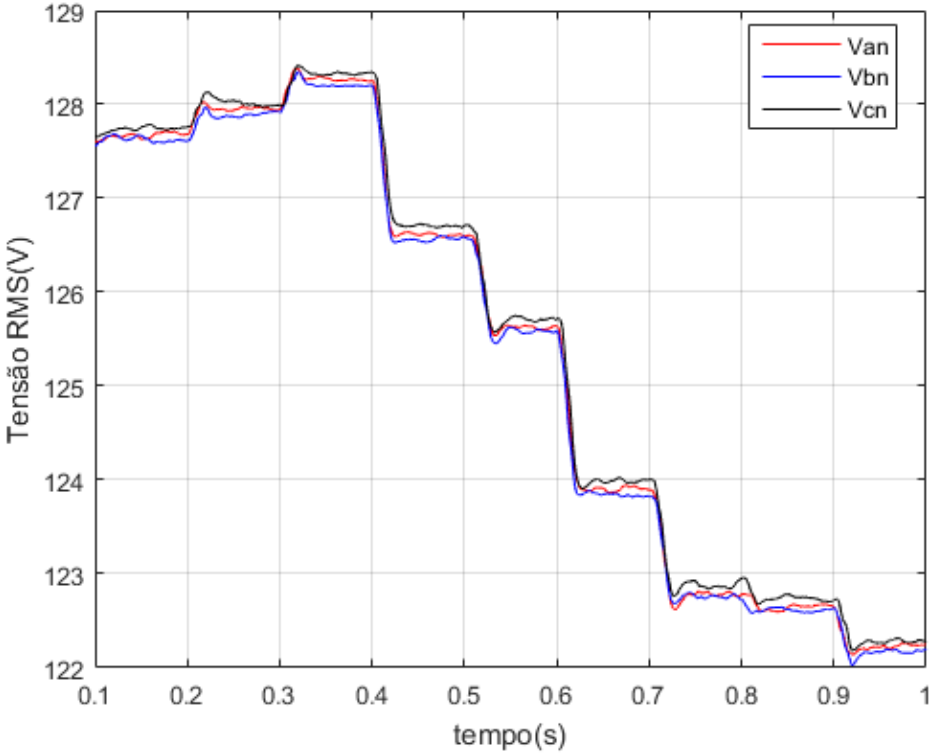


Fonte: Matlab/Simulink.

A partir das Figuras 21 e 22, é possível notar que o CFR primeiro absorve toda a potência ativa do CSR em sua bateria até o instante t=0,4s. A capacitância reativa gerada pelo sistema de filtragem passiva também é absorvida pelo CSR. Com as ligações elétricas, o fluxo de potência do CFR foi invertido, passando a suportar uma potência ativa de 56kW e uma reativação induzida de 28kVar. Mostra-se imediatamente que o CFR pode funcionar durante a operação isolada do microrrede em todos os quatro quadrantes de potência.

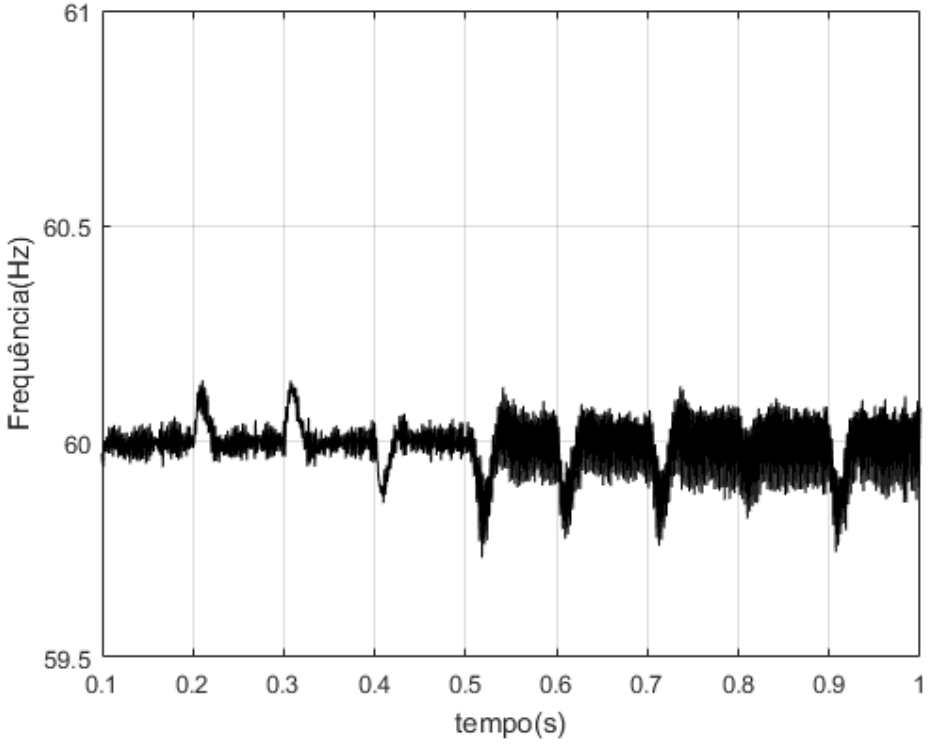
Na última análise, a tensão rms e a frequência elétrica no PAC do microrrede durante toda a operação isolada são mostradas nas Fig. 23 e 24 para referência. A tensão de operação nesta condição de operação do PAC variou de 122 a 128,3V, enquanto a frequência variou de 59,79 a 60,12Hz. Como a operação de microrrede isolada da ANEEL não é regida por nenhuma regulamentação, é impossível avaliar o desempenho neste ambiente operacional.

Figura 23 – Microrrede na operação isolada: Tensão rms por fase.



Fonte: Matlab/Simulink.

Figura 24 – Microrrede na operação isolada: Frequência elétrica.



Fonte: Matlab/Simulink.

4 CONCLUSÃO

Diante dos resultados gerados com a simulação, na operação conectada à rede elétrica o conversor supridor de rede assegura a injeção de potência ativa atingindo aproximadamente 20 kW, já a potência reativa é injetada na rede pelo conversor formador de rede no início do período de simulação, que posteriormente ajuda na regulação de tensão ao injetar potência ativa de 20 kW. No que se refere a tensão rms e frequência elétrica, ambos encontram-se dentro das demarcações da ANEEL.

Em comparação, na operação da microrrede em modo ilhado, o conversor supridor de rede também não auxilia na injeção de reativos e sua potência ativa é absorvida pelo conversor formador de rede, que tem seu fluxo de potência invertido ao conectar as cargas elétricas, constatando que o CFR consegue operar em todo tempo de simulação.

Portanto, com as análises apresentadas da simulação do modelo da microrrede de energia elétrica, o conversor formador de rede que a alimenta evidencia sua importância ao garantir a operação em modo ilhado, como também, sua execução na operação conectada à rede elétrica. Similarmente, o conversor supridor de rede obtém os mesmos resultados em ambos, mediante seu bom funcionamento na injeção de potência ativa.

Deste modo, considerando a geração distribuída um assunto novo e com tendência a crescer, é fundamental estudá-lo a fim de acompanhar a evolução do sistema elétrico de potência. Assim como, buscar benefícios para o mundo a partir de tecnologias que trazem novas soluções em demandas atuais, como fornecer eletricidade a lugares remotos, isto é, levar conhecimento e novas oportunidades a pessoas. E também por prover de fontes renováveis, em busca da preservação do meio ambiente.

Por fim, mesmo tratando de um assunto específico, nota-se que a engenharia é um ramo bem amplo e com possibilidades infinitas mesmo não sendo trivial sua escolha. Todos que a estudam adquirem crescimento pessoal considerando que o curso requer de dedicação durante os anos de teoria e prática. Com um enriquecimento de ideias, pensamentos e atitudes, na busca constante em atingir seus objetivos. Mostra as fraquezas e o quão forte o estudante pode ser com o passar do tempo perante as adversidades do cotidiano.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AAMIR, M.; KALWAR, K. A.; MEKHILEF, S. **Uninterruptiblepowersupply (ups) system**. Renewableandsustainableenergyreviews, Elsevier, v. 58, p. 1395–1410, 2016.

AKAGI, H. "**Active Harmonic Filters**," *Proc. IEEE*, vol. 93, no. 12, pp. 2128–2141, Dec. 2005.

A. Agência Nacional de Energia Elétrica, "Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica," 2015.

ANTUNES, H. M. A. et al. **Conversor multifuncional reconfigurável e tolerante a falhas para microrredes de energia elétrica**. p. 41-99. Tese (Doutorado) – UFMG, Março, 2018.

BALANUTA, C.; VECHIU, I.; GURGUIATU, G. **Improving micro-grid power quality usingthree-phase four-wire active power conditioners**. In: IEEE.16th International Conferenceon Control and Computing. [S.l.], 2012.

_____. Harmoniccompensationusing a series hybridfilter in acentralized ac microgrid. **Journal of control, automation and electrical systems, springer**, p. 1–11, 2018.

BARNES, M. et al. **Real-world microgrids-an overview.** In:Systemof Systems Engineering,2007. SoSE '07. IEEE International Conferenceon. 2007.

BHENDE, C.; KALAM, A. **Power qualityconditioner for microgrid**. In: IEEE. Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC). 2013.

BOROYEVICH, D. et. al. **Future electronic power distribution systems a contemplative view.** In: 2010 12th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment. IEEE, 2010.

BRANDÃO, D. I. **Coordinatedpower-basedcontrolandutility interface converter in lowvoltagemicrogrids**. 145 p. Tese (Doutorado), FEEC - UNICAMP, December 2015.

CHEN, S. X.; GOOI, H. B.; WANG, M. Q. **Sizingofenergystorage for microgrids.** IEEE Transactionson Smart Grid, v. 3, n. 1, p. 142–151, March 2012.

CHO, Y. et al. **A single-loop repetitivevoltagecontrollerwithanactivedampingcontrol technique.Energies, Multidisciplinary Digital PublishingInstitute**, v. 10, n. 5, p. 1–13, 2017.

COSTA, P. F. Capítulo v transformadores de aterramento partei. **Revista o Setor Elétrico**, p. 60–67 e 46-53, novembro 2014.

CUPERTINO, A. F.; RESENDE, J. T.; PEREIRA, H. A.; e SELEME, S. I. "**A grid-connected photovoltaic system with a maximum power point tracker using passivity-based control applied in a boost converter**," em *2012 10th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications*, 2012, pp. 1–8.

DAS, J. C. “**Passive filters-potentialities and limitations**,” in *Conference Record of the 2003 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference, 2003.*, 2003, vol. 40, no. 1, pp. 187–197.

EID, B. M. et al. **Controlmethodsandobjectives for electronicallycoupleddistribute denergyresources in microgrids**: A review.IEEE Systems Journal, PP, n. 99, p. 1–13, 2014.

FILHO, E. V. et al. **Bidirectional converter for distributedgenerationwith grid-supportingcapacity.** In: IEEE.2015 IEEE 13th Brazilian Power ElectronicsConferenceand 1stSouthern Power ElectronicsConference (COBEP/SPEC). [S.l.], 2015.

HAVA, A. M.; KERKMAN, R. J.; e LIPO, T. A. “**Simple analytical and graphical methods for carrier-based PWM-VSI drives**,” *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 14, no. 1. pp. 49–61, 1999.

HATZIARGYRIOU, N. et al. **Microgrids**. IEE Epowerandenergy magazine, IEEE, v. 5, n. 4, p. 78–94, 2007.

HE, J. et al. **Investigation and active damping of multiple resonances in a parallel-inverter-based microgrid**. IEEE Transactions on Power Electronics, v. 28, n. 1, p. 234–246, Jan. 2013.

HOJO, M. et al. **A controlmethodofparallel inverter for smartislandingof a microgrid**. ICREPQ, v. 1, n. 6, p. 793–798, March 2008.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. (02 de março de 2018). **IEA Statistics 2015** International Energy Agency. Disponível em|: <: www.iea.org/statistics>. Acesso em 20 nov. 2020.

STANDARDS ASSOCIATION. IEEE Std 1547.4: **Ieeeguide for design, operation, andintegrationof distributedresourceisland systems withelectricpower systems**. NewYork, 2011.

KANELLOS, F. D.; TSOUCHNIKAS, I.; HATZIARGYRIOU, N. D. e MEMBER, S. “**Micro-Grid Simulation during Grid-Connected and Islanded Modes of Operation**,” *Int. Conf. Power Syst. Transients*, p. 6, 2005.

KATIRAEI, F. et al. **Microgrids management**. Power and Energy Magazine, IEEE, IEEE, v. 6, n. 3, p. 54-65, 2008.

KROPOSKI, B. et al. **Makingmicrogridswork**. IEEE Power and Energy Magazine, v. 6, n. 3, p. 40–53, May 2008.

LASSETER, R. H. **Microgrids**. In: PowerEngineering Society Winter Meeting, 2002.IEEE. v. 1, p. 305–308 vol.1. [S.l.: s.n.], 2002.

LOPES, J. A. P.; MADUREIRA, A. G.; MOREIRA, C. C. L. M. A **viewofmicrogrids**. WileyInterdisciplinaryReviews: Energy and Environment, Wiley Online Library, v. 2, n. 1, p. 86–103, 2013.

_____. **Defining control strategies formicro grid sislande do peration**. IEEE Transactionson Power Systems, v. 21, n. 2, p.916–924, May 2006.

LOPES, J. A. P. et al. **Controlstrategies for microgridsemergencyoperation**. In: FuturePower Systems, 2005 International Conferenceon. [S.l.: s.n.], 2005.

_____, C. L.; RESENDE, F. O. **Microgridsblack start andislandedoperation**. In:15th Power systems computation conference (PSCC), Liege. [S.l.: s.n.], 2005.

_____;_____Controlstrategies for microgrids blackstartandislande doperation. International **JournalofDistributed** Energy Resources, v. 1, n. 3, p. 241–261, 2005.

MA, J. et al. **A multiple-loop feedback controlstrategysuitable for different operation modeso fmicrogrid**. International Transactionson Electrical Energy Systems, Wiley Online Library, v. 25, n. 6, p. 1059–1074, 2015.

MAJUMDER, R.; BAG, G. Parallel operationof converter interface dmultiple microgrids.International **JournalofElectrical Power & Energy Systems**, Elsevier, v. 55, p. 486–496,2014.

MATOS, J. G.; RIBEIRO, L. A.; e 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**," *Rev. Eletrônica Potência*, vol. 19, no. 2, pp. 152–162, 2014.

MONICA, P.; KOWSALYA, M. **Control strategies of parallel operated inverters in renewa-ble energy application:** A review.Renewable and Sustainable Energy Reviews, Elsevier,v. 65, p. 885–901, 2016.

RAHMAN, S. A. e VARMA, R. K. "**PSCAD/EMTDC model of a 3-phase grid connected photovoltaic solar system**," em *2011 North American Power Symposium*, 2011, pp. 1–7.

RAJKUMAR, V., D.K. Khatod, **Optimal planning of distributed generation systems in distribution system: A review**, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 16 (7), p. 5146-5165, 2012.

RESE, L.; COSTA, A. S.; SILVA, A. S. e. Enhancedmo delingand controlofvsisin microgrids operating in grid-connected mode. In:2012 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT). [S.l.: s.n.], 2012.

REZNIK, M. G. S.; AL-DURRA, A. e MUYREEN, S. M. "**LCL filter design and performance analysis for small wind turbine systems**," em *2012 IEEE Power Electronics and Machines in Wind Applications*, 2012, pp. 1–7.

ROCABERT, J. et al. **Controlo fpower converters in ac microgrids**. IEEE Transactionson Power Electronics, v. 27, n. 11, p. 4734–4749, Nov 2012.

RODRIGUEZ, P.; TEODORESCU, R.; CANDELA, I.; TIMBUS, A. V.; LISERRE, M. e

BLAABJERG, F. “**New Positive-sequence Voltage Detector for Grid Synchronization of Power Converters under Faulty Grid Conditions**,” em *37th IEEE Power Electronics Specialists Conference*, 2006, pp. 1–7.

SAHOO, S. K.; SINHA, A. K.; KISHORE, N. K. **Controltechniques in ac, dc, and hybridac-dcmicrogrid**: A review. IEEEJournalof Emergingand Selected Topics in Power Electronics, PP, n. 99, p. 1–1, 2017.

SANTOS, Fernando Antônio Castilho dos; SANTOS, Fernando Miguel Soares Mamede dos. Geração Distribuída Versus Centralizada. Matéria do site Millenium. **Revista do ISPV**, nº35, novembro de 2008.

SILVA, F. L. d. **Análise do desempenho de uma microrrede com múltiplas unidades de geração distribuída.** 103 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Programade Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federaldo Espírito Santo, 2011.

SILVA, S. M. “**Estudo e Projeto de um Restaurador Dinâmico de Tensão**,” PPGEE-UFMG, 1999.

SILVA, S. M. e FILHO, B. J. C. “**Component-minimized voltage sag compensators**,” em *Conference Record of the 2002 IEEE Industry Applications Conference. 37th IAS Annual Meeting (Cat. No.02CH37344)*, 2002, vol. 2, pp. 883–889.

SINGER, S. et al. **The energy report**: 100% renewable energy by 2050. [S.l.]: Ecofys bv,2010.

SOLANKI, A.; NASIRI, A.; NOVAKOVIC, B. e BHAVARAJU, V. “**State space modeling and stability assessment for a microgrid**,” em *2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2015, pp. 533–538.

STEVENS J., Harry Vollkommer P.E. e Klapp K. **CERTS Microgrid System Tests**, IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2007.

VECHIU, I.; CUREA, O.; LLARIA, A. e CAMBLONG, H. “**Control of power converters for microgrids**,” *COMPEL - Int. J. Comput. Math. Electr. Electron. Eng.*, vol. 30, no. 1, pp. 300–309, Jan. 2011.

WANG, J. et al. **Design of a generalized controlalgorithm for parallelinverters for smooth microgrid transition operation**. Industrial Electronics, IEEE Transactionson, IEEE,v. 62, n. 8, p. 4900–4914, 2015.

XU, L.; MIAO, Z. e FAN, L. “**Coordinated control of a solar and battery system in a microgrid**,” em *PES T&D 2012*, 2012, pp. 1–7.

YAZDANI, A. e IRAVANI, R. ***Voltage-Sourced Converters in Power Systems***, vol. 53. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2010.

YOUSIF, S. N. A.; WANIK, M. Z. C. e MOHAMED, A. “Implementation of different passive filter designs for harmonic mitigation,” em *PECon 2004. Proceedings. National*

Power and Energy Conference, 2004., 2004, pp. 229–234.