



JOÃO EDUARDO RIBEIRO

**CONTROLE BASEADO NA REFERÊNCIA SÍNCRONA PARA
CONVERSORES FORMADORES DE REDE**

LAVRAS – MG

2019

JOÃO EDUARDO RIBEIRO

**CONTROLE BASEADO NA REFERÊNCIA SÍNCRONA PARA CONVERSORES
FORMADORES DE REDE**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Universidade Federal de Lavras, como parte
das exigências do do curso de Engenharia de
Controle e Automação, para a obtenção do
título de Bacharel.

Profa. DSc. Sílvia Costa Ferreira

Orientadora

LAVRAS – MG

2019

JOÃO EDUARDO RIBEIRO

**CONTROLE BASEADO NA REFERÊNCIA SÍNCRONA PARA CONVERSORES
FORMADORES DE REDE**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Universidade Federal de Lavras, como parte
das exigências do do curso de Engenharia de
Controle e Automação, para a obtenção do
título de Bacharel.

APROVADA em 25 de Novembro de 2019.

Prof. DSc. Leonardo Silveira Paiva UFLA
João Paulo de Carvalho Pedroso PPGESISA

Profª. DSc. Sílvia Costa Ferreira
Orientadora

**LAVRAS – MG
2019**

*Dedico esse trabalho a minha amada avó, Santa Murari.
Eternas saudades.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente, à força universal que me rege, me guarda e me direciona para os caminhos da verdade. Em segundo lugar, agradeço a mim mesmo, não como um ato de egoísmo e sim de reconhecimento por meu esforço para chegar até aqui.

Agradeço aos meus pais, Alexandra de Paula e João Batista, por permitirem que esse sonho se tornasse realidade.

À minha namorada Janaina de Paula, que sempre esteve ao meu lado em toda caminhada, sendo amparo e minha confidente.

Ao meu irmão caçula, Lucas Piva, pelos gestos de amor e amor durante esse ciclo. Ao meu irmão mais velho, Bruno Ribeiro, sempre sábio e paciente comigo.

A minha orientadora e amiga, Silvia, por ser um anjo que me guiou na vida acadêmica, me deu oportunidade e sempre acreditou em meu potencial.

À Universidade Federal de Lavras, aos professores, técnicos e amigos que de alguma forma contribuíram para o meu crescimento pessoal e intelectual.

*"...Se você quiser alguém em quem confiar
Confie em si mesmo
Quem acredita sempre alcança!"
(Renato Russo)*

RESUMO

Uma microrrede é composta por vários sistemas de geração distribuída, de armazenamento e cargas. No entanto, o controle e operação desses sistemas são muito complexos, principalmente nas microrredes que operam em modo ilhado. Nessa condição de operação, os conversores formadores de rede são responsáveis por manter o funcionamento adequado da microrrede, controlando a amplitude da tensão e a frequência de acordo com a referência dada a eles. O uso do controle linear proporcional integral com as variáveis em sistema de referência síncrona é amplamente difundido na literatura. Esse trabalho consiste em desenvolver uma malha de controle utilizando controladores lineares proporcionais integrais para o conversor formador de rede com sistema de armazenamento em baterias operando em modo ilhado. Esse sistema é simulado em *software* MATLAB/Simulink para cargas R e RL com acréscimo de degrau de cargas considerado como distúrbio. Os resultados obtidos por meio de simulações mostram que o sistema proposto segue as referências de amplitude e frequência da tensão para as cargas estudadas, com boa resposta dinâmica.

Palavras-chave: Controle PI em Referência Síncrona. Conversor Formador de Rede. Microrrede ilhada.

ABSTRACT

A microgrid consists of distributed generation systems, storage and loads. However, the control and operation of these systems are not simple, especially in island mode. In this operating condition, grid-forming converters are responsible for maintaining the proper functioning of the microgrid by controlling voltage amplitude and frequency according to a reference. The use of integral linear control in synchronous reference frame is commonly presented in the literature. This work presents a control loop that uses integral proportional linear controllers for a grid-forming converter with battery storage system operating in island mode. The system is simulated in MATLAB / Simulink for R and RL loads with additional step runs considered as disturbance. Simulations results show the grid-forming converter ability of tracking voltage amplitude and frequency references under the R and RL loads (linear loads), with good dynamic response.

Keywords: Synchronous Reference Frame. Grid-forming converter. Islanded Microgrids.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Diagrama Fasorial Transformada de Clarke	15
Figura 2.2 – Diagrama Fasorial Transformada de Park para Tensão e Corrente.	16
Figura 2.3 – Arquitetura de uma Microrrede CA	17
Figura 2.4 – Topologia Trifásica com Três Pernas	20
Figura 2.5 – Conversor Alimentador de Rede como Fonte de Corrente	21
Figura 2.6 – Conversor de Suporte à Rede como Fonte de Corrente	22
Figura 2.7 – Conversor Formador de Rede como Fonte de Tensão	23
Figura 3.1 – Topologia do CFR com filtro LC	27
Figura 3.2 – Malha de controle de tensão e corrente para o CFR	28
Figura 3.3 – Comportamento do sinal de referência eixo abc	29
Figura 3.4 – Comportamento do sinal de referência no eixo dq	29
Figura 3.5 – Topologia do CFR com filtro LC operando à vazio	31
Figura 3.6 – Topologia do CFR com filtro LC e carga R	32
Figura 3.7 – Topologia do CFR com filtro LC e carga RL	33
Figura 4.1 – Comportamento da tensão fornecida pelo inversor operando à vazio	34
Figura 4.2 – Comportamento da tensão no eixo dq fornecida pelo inversor operando à vazio	35
Figura 4.3 – Comportamento da corrente no eixo dq fornecida pelo inversor operando a vazio	35
Figura 4.4 – Comportamento da tensão fornecida pelo inversor operando à vazio	36
Figura 4.5 – Comportamento da tensão fornecida pelo inversor com carga resistiva	36
Figura 4.6 – Comportamento da corrente fornecida pelo inversor com carga resistiva	36
Figura 4.7 – Comportamento da tensão no eixo dq fornecida pelo inversor com carga resistiva	37
Figura 4.8 – Comportamento da corrente no eixo dq fornecida pelo inversor com carga resistiva	38
Figura 4.9 – Comportamento da tensão e corrente fornecida pelo inversor com distúrbio no sistema	38
Figura 4.10 – Erros dos controladores	39
Figura 4.11 – Comportamento da tensão fornecida pelo inversor para carga resistiva indutiva	40

Figura 4.12 – Comportamento da corrente fornecida pelo inversor para carga resistiva indutiva	40
Figura 4.13 – Comportamento da tensão, no eixo dq fornecida pelo inversor com carga resistiva indutiva	40
Figura 4.14 – Comportamento da corrente no eixo dq fornecida pelo inversor com carga resistiva indutiva	41
Figura 4.15 – Comportamento da tensão fornecida pelo inversor com carga resistiva indutiva	41
Figura 4.16 – Comportamento da tensão e corrente fornecida pelo inversor com distúrbio no sistema	42
Figura 4.17 – Erros dos controladores	43
Figura 1 – Malha para microrrede operando em modo ilhado com carga R	47
Figura 2 – Malha para microrrede operando em modo ilhado com carga RL	47
Figura 3 – Malha do PLL	47
Figura 4 – Malha para gerar o sinal em referência síncrona	48
Figura 5 – Malha de controle	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Parâmetros utilizados na simulação	28
Tabela 3.2 – Ganhos apresentado por Antunes, Silva e Filho (2016) para os controladores da malha de tensão e de corrente	30

SUMÁRIO

1	Introdução	12
1.1	Objetivos	13
2	Referencial Teórico	14
2.1	Referência Síncrona	14
2.1.1	Transformada de Clarke	14
2.1.2	Transformada de Park	15
2.2	Microrredes	17
2.3	Modos de Operação	18
2.3.1	Modo de Operação Conectado à Rede	18
2.3.2	Modo de Operação Ilhado	18
2.4	Topologia de Conversores	19
2.5	Classificação e Controle de Conversores	20
2.5.1	Conversor Alimentador de Rede - CAR	20
2.5.2	Conversor de Suporte à Rede - CSR	21
2.5.3	Conversor Formador de Rede - CFR	23
2.5.3.1	Método de controle para CFR operando em modo ilhado	24
2.5.3.2	Técnica de Sintonia de Controladores	25
3	Metodologia	27
3.1	Descrição do sistema	27
3.2	Malha de Controle do Conversor Formador de Rede	28
3.2.1	Sintonia de Controladores	30
3.3	Simulação	31
3.3.1	Caso A: operação a vazio e erros dos controladores	31
3.3.2	Caso B: carga puramente resistiva	32
3.3.3	Caso C: carga resistiva indutiva	33
4	Resultados e Discussões	34
4.1	Caso A: operação à vazio	34
4.2	Caso B: carga puramente resistiva	36
4.2.1	Caso C : carga resistiva indutiva	39
5	CONCLUSÕES	44
	REFERÊNCIAS	45

APENDICE A – Diagramas usados na simulação Matlab/Simulink	47
---	-----------

1 INTRODUÇÃO

Uma microrrede é uma parcela delimitada do sistema elétrico que engloba unidades de geração distribuída (GD), sistemas de armazenamento e cargas, entregando energia confiável e de qualidade. Este sistema pode operar em dois modos: conectado à rede elétrica ou de forma ilhada. No modo de operação conectado à rede, se a energia gerada pelas GDs não é suficiente, então a rede elétrica principal é responsável por suprir a demanda das cargas. Por outro lado, se há produção de energia em excesso, essa pode ser absorvida pela rede elétrica. Já em modo ilhado, deve existir um balanço entre demanda e geração, uma vez que a rede elétrica não estará disponível. Visando atender esses requisitos é mandatório que exista algum controle da amplitude da tensão, frequência, potência ativa e reativa (OLIVARES et al., 2014).

Segundo Patrao et al. (2017), os conversores utilizados em microrredes são classificados como: Conversores Alimentadores de Rede (CAR), Conversores de Suporte à Rede (CSR) e Conversores Formadores de Rede (CFR). O CAR é projetado para fornecer toda a energia ativa disponível pelo gerador à rede elétrica. Já o CSR ajusta sua potência de saída para ajudar na regulação de tensão e frequência da microrrede, deixando esses valores próximos dos nominais.

O CFR, por sua vez, pode ser representado com uma fonte de tensão CA ideal. O CFR geralmente possui um sistema de armazenamento de energia e é responsável por gerar referências de tensão e frequência para a microrrede. Além disso, é encarregado de controlar conexão e desconexão da microrrede com rede elétrica principal, e gerenciar o fluxo de potência ativa e reativa. Dessa forma, na ausência de geração por meio de outras fontes renováveis, o CFR é responsável por suprir a demanda da carga.

Kouro et al. (2009) afirmam que diversas técnicas de controle podem ser aplicadas aos CFR, como controle preditivo, fuzzy, adaptativos, modo deslizante e preditivo. Entretanto, a técnica tradicional mais utilizada é o uso do controlador linear PI (Proporcional - Integral) no sistema de referência síncrona devido à sua robustez e fácil implementação.

Neste trabalho é apresentada uma malha de controle utilizando controladores lineares PI em cascata, para controle de tensão e corrente. O objetivo é que o CFR forneça referências confiáveis de tensão (amplitude e frequência) para uma microrrede que opera ilhada, com cargas R e RL. Para validar o funcionamento deste sistema de controle, foram realizadas simulações no *software* MATLAB/Simulink utilizando cargas puramente resistiva e resistiva-indutiva.

Os resultados mostraram que por meio de uma malha de controle PI em referência síncrona é possível criar para uma microrrede ilhada, referência de tensão e frequência. A tensão

gerada na saída do conversor formador de rede apresenta uma tensão de pico de 180V, correspondente a uma tensão de fase-neutro de 127V e frequência de 60Hz. Dessa maneira, o sistema proposto foi capaz de criar referência para a amplitude de tensão e também para a frequência da microrrede operando em modo ilhado para cargas R e RL.

1.1 Objetivos

O objetivo deste trabalho é implementar no *software* MATLAB/Simulink um conversor formador de rede utilizando controlador linear proporcional-integral (PI) no sistema de referência síncrona.

Como objetivos específicos podem ser listados os seguintes:

- a) Apresentar os conceitos do sistema de coordenadas síncrona, também conhecido como sistema de coordenadas dq ;
- b) Rever as principais classificações de conversores para microrredes e suas as malhas de controle utilizando PIs na referência síncrona;
- c) Avaliar a regulação de tensão e qualidade da tensão gerada pelo CFR em malha fechada alimentando cargas lineares resistivas e resistivas-indutivas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo apresenta uma breve revisão bibliográfica sobre referência síncrona e suas matrizes de transformação. Além disso, são apresentados conceitos introdutórios sobre microrredes e seus modos de operação, e as classificações e técnicas de controle utilizadas em conversores eletrônicos.

2.1 Referência Síncrona

Referência síncrona é uma transformação matemática muito utilizada para controle de conversores eletrônicos que possuem variáveis alternadas, como é o caso da tensão e corrente de um sistema elétrico (SERGEJ; ASIMINOAEI; HANSEN, 2009).

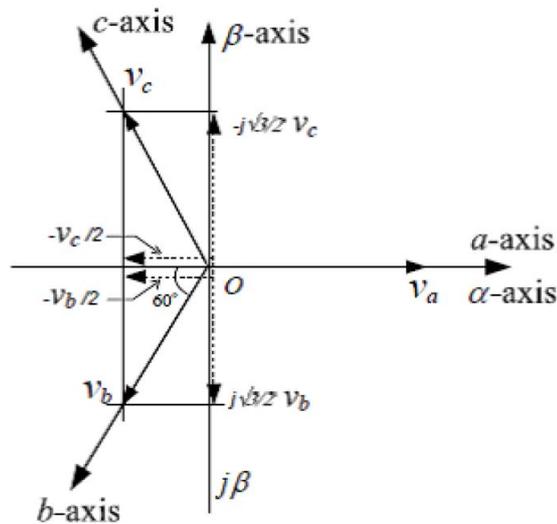
Basicamente, a técnica consiste em uma relação de transformadas matemáticas que permitem representar um sistema de referência trifásico abc em um sistema síncrono de coordenadas dq , denominados eixo direto e de quadratura, respectivamente. Tal transformação permite obter as componentes fundamentais de sequência positiva, negativa e zero de um sistema desequilibrado (onde tensões e/ou correntes não estão defasadas de 120° ou apresentam amplitudes de diferentes entre as fases). Além disso, o sistema de coordenadas dq permite um entendimento dos fenômenos físicos que ocorrem no sistema pois transforma em valores constantes a tensão e/ou corrente fundamentais, facilitando a separação das componentes harmônicas (GONZATTI et al., 2014).

A transformação para o sistema de coordenadas síncrono é feito por meio de duas etapas: Transformada de Clarke e Transformada de Park. Ao fim da transformação a componente fundamental se torna um sinal contínuo, podendo ser filtrado sem que ocorra problemas de defasagem. Além disso, as componentes fundamentais transformadas carregam todas as informações do sinal original (DISHA et al., 2016).

2.1.1 Transformada de Clarke

A Transformada de Clarke consiste em uma transformação escalar, como mostra a Figura 2.1, que converte as grandezas de corrente e/ou tensão trifásicos no sistema de coordenadas abc em um sistema de coordenadas bifásicos nos eixos $\alpha\beta$. Já a transformada inversa de Clarke é utilizada para retornar um sinal do eixo $\alpha\beta$ para o sistema trifásico abc .

Figura 2.1 – Diagrama Fasorial Transformada de Clarke



Fonte: Kumar, Zare e Ghosh (2017)

As matrizes de transformação utilizadas para a transformada direta, abc para $\alpha\beta$, e para a transformada inversa, $\alpha\beta$ para abc , são dadas pelas equações (2.1) e (2.2), respectivamente,

$$\begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \\ X_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

$$\begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} = -\sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & 1 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \\ X_0 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

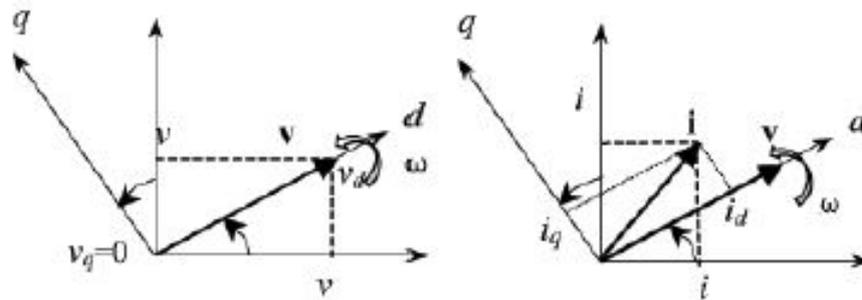
onde, X_a , X_b e X_c são os valores de tensão ou corrente no sistemas de coordenadas abc e X_α , X_β e X_0 representam as mesmas variáveis já no sistema de coordenadas $\alpha\beta$.

2.1.2 Transformada de Park

A Transformada de Park ou transformada dq é realizada após a Transformada de Clarke, com o objetivo de criar uma referência síncrona rotativa, onde os dois vetores ortogonais, em $\alpha\beta$, giram com a frequência da rede, conforme ilustra a Figura 2.2.

É possível observar que os eixos $\alpha\beta$ são estacionários e os eixos direto (d) e de quadratura (q) giram com uma velocidade angular constante. Assim, a Transformada de Park, pode ser sintetizada como uma mudança de referencial, onde a referência é, nesta aplicação, a frequência

Figura 2.2 – Diagrama Fasorial Transformada de Park para Tensão e Corrente.



Fonte: Kumar, Zare e Ghosh (2017)

da rede. A componente fundamental, geralmente em 60Hz, equivale então a uma componente contínua, que por sua vez, pode ser facilmente extraída por meio de um filtro passa-baixas, ou utilizadas em malhas com controladores PI. É importante notar que, como o sinal fundamental a ser extraído é contínuo nos eixos, a filtragem na referência síncrona é imune a quaisquer erros de fase introduzidos pelo filtro passa-baixas, o que torna esse método muito mais vantajoso quando comparado a uma filtragem comum.

As matrizes de transformação utilizadas para a transformada direta, do eixo $\alpha\beta$ para o eixo dq, e para a transformada inversa, do eixo dq para o $\alpha\beta$, são exemplificadas pelas equações 2.3 e 2.4, respectivamente,

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{sen}(\omega_t) & -\text{cos}(\omega_t) \\ \text{cos}(\omega_t) & \text{sen}(\omega_t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

onde, ω_t representa a frequência angular da rede, X_d e X_q são os valores de tensão ou corrente no sistemas de coordenadas dq e X_α e X_β representam as mesmas variáveis já no sistema de coordenadas $\alpha\beta$, respectivamente.

A transformada inversa de Park realiza a transformação de um sinal no eixo dq para o eixo $\alpha\beta$ e é equacionada em 2.4 .

$$\begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{sen}(\omega_t) & \text{cos}(\omega_t) \\ -\text{cos}(\omega_t) & \text{sen}(\omega_t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

onde, ω_t representa a frequência angular da rede, X_d e X_q são os valores de tensão ou corrente no sistemas de coordenadas dq e X_α e X_β representam as mesmas variáveis já no sistema de coordenadas $\alpha\beta$.

2.2 Microrredes

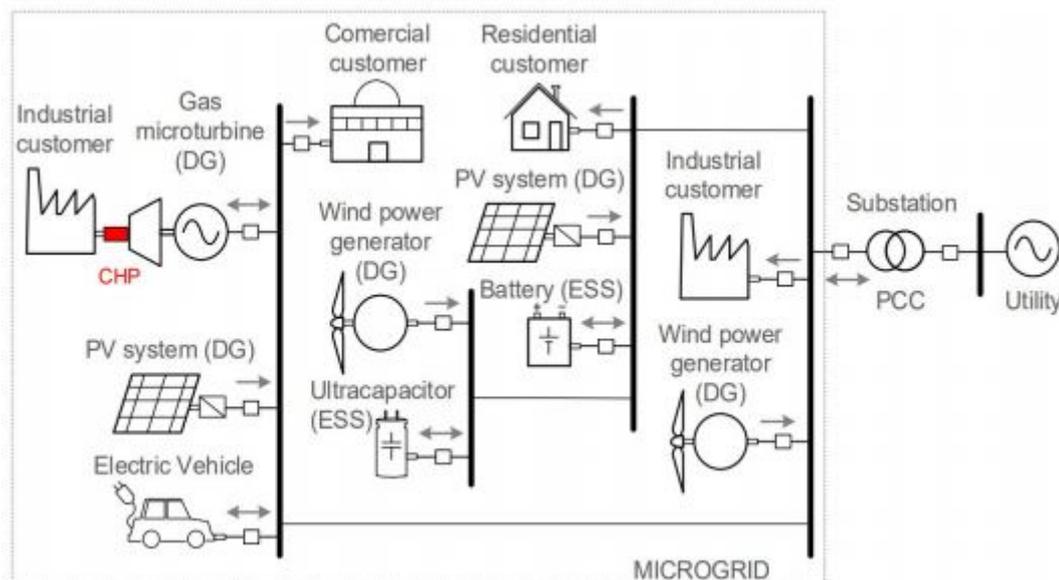
Lasseter (2001) define que microrredes são sistemas compostos por um conjunto de cargas, unidades de geração distribuída e sistemas de armazenamento, podendo operar conectado à rede elétrica ou de forma isolada. Piagi e Lasseter (2006) completam que, microrrede é um termo utilizado para representar um conjunto de cargas e geradores interligados, formando um sistema único e controlado.

Uma microrrede pode atender usuários finais de energia, sejam eles residenciais, comerciais e industriais, que impulsionam o desenvolvimento das microrredes devido às suas vantagens econômicas. As concessionárias de energia, por sua vez, são beneficiadas pela redução das perdas (GUERRERO et al., 2007).

Microrredes podem assumir uma arquitetura CA (corrente alternada), ou CC (corrente contínua), sendo a arquitetura determinada pela natureza das cargas e geradores distribuídos existentes. A principal vantagem da arquitetura CA, é a sua compatibilidade com a infraestrutura do sistema elétrico atual. Por outro lado, a principal desvantagem deste tipo de arquitetura é o grande número de conversores eletrônicos necessários para realizar a sincronização com a rede (LEDE et al., 2017).

Um exemplo de microrrede CA é apresentado na Figura 2.3, onde cada fonte geração distribuída (em inglês, *distributed generation - DG*) e sistema de armazenamento (em inglês, *Energy Storage Systems - ESS*) utiliza um conversor para interface com a rede elétrica.

Figura 2.3 – Arquitetura de uma Microrrede CA



Fonte: Lede et al. (2017)

Por outro lado, o principal desafio da microrrede em arquitetura CC consiste na ausência de estrutura da rede elétrica CC e pouca disponibilidade de sistemas de proteção (relés). Outro ponto muito significativo é que a energia gerada e transmitida em CC deve ser convertida, para que esta atenda às cargas CA (LEDE et al., 2017).

Este trabalho irá focar na operação de microrredes CA, tratadas agora apenas como microrredes, devido a maior facilidade de integração com o sistema elétrico já existente.

2.3 Modos de Operação

As microrredes podem operar conectadas em paralelo à rede, isoladas ou em transição entre os dois modos. No modo de operação isolado é necessário um conversor capaz de controlar a amplitude e a frequência da tensão da microrrede. Por outro lado, no modo conectado à rede o sistema elétrico é utilizado como referência para o controle da tensão e frequência (LASSETER, 2001).

2.3.1 Modo de Operação Conectado à Rede

Quando a microrrede está conectada à rede principal, esta é responsável por gerar as referências de amplitude e frequência da tensão e ainda, absorver ou fornecer energia de acordo com a geração (OLIVARES et al., 2014). Mas, é de extrema importância métodos de controle aplicados que sejam eficiente e robustos para sincronizar à rede e microrrede. Geralmente, são utilizados algoritmos de sincronismo controlando a fase e frequência da tensão. Nesse cenário, as cargas podem ser alimentadas tanto pela rede elétrica quanto pelos geradores distribuídos da microrrede (HAO; ZHEN, 2017).

2.3.2 Modo de Operação Ilhado

Quando a microrrede está em modo de operação ilhado, é necessário um controle de potência ativa e reativa rigoroso, equilibrando as potências com a demanda das cargas locais. Neste modo de operação são necessários conversores eletrônicos específicos capazes de fornecer referências estáveis. E ainda, eles devem ser capazes de controlar e gerenciar o fluxo de potência nesta microrrede, principalmente se ocorrer transição entre os modos de operação. Um bom controle de fluxo de potência, garante maior vida útil do sistema, evitando possíveis sobrecargas em momentos de transição.

O modo de operação ilhado ocorre quando parte da microrrede torna-se eletricamente isolada da subestação da concessionária, porém permanece energizada por geradores distribuídos (JAMIL et al., 2009).

2.4 Topologia de Conversores

Segundo Rocabert et al. (2012) os CFR podem ser representados como uma fonte ideal de tensão CA, com baixa impedância de saída. Nesses conversores, a amplitude e a frequência de tensão são controladas para gerar a referência para os demais conversores quando a microrrede está em modo ilhado. Um melhor aproveitamento desse conversor é o uso em modo bidirecional, ou seja, podendo fornecer ou armazenar energia.

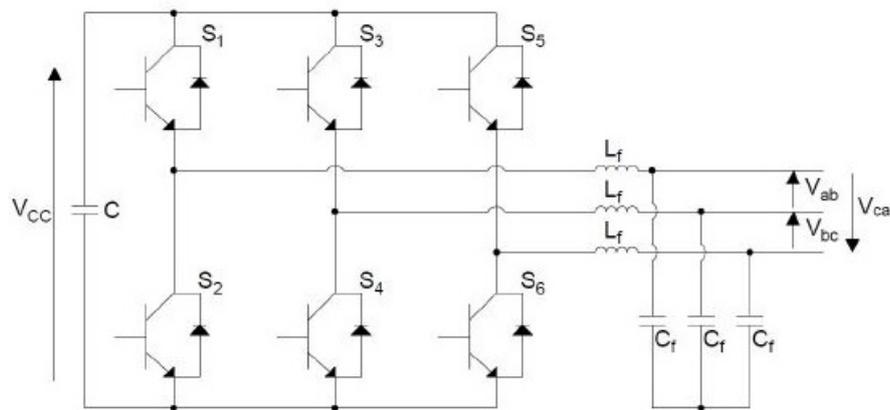
Os CRFs são conectados à rede através de filtros L, LC ou LCL. O uso desses filtros tem intuito de diminuir o efeito das frequências resultantes do chaveamento do conversor, garantindo que a tensão e corrente de saída se aproximem o máximo possível de uma senoide ideal (ANTUNES et al., 2017).

Uma configuração amplamente adotada para CFRs consiste de um inversor trifásico com modulação por largura de pulsos (módulo de potência), um filtro LC na saída e um sistema de armazenamento de energia (baterias) no barramento CC (MEERSMAN et al., 2010).

Os harmônicos de altas frequências, provenientes dos chaveamentos são minimizados com uso de filtros passivos passa-baixa. O filtro LC de segunda ordem tem melhor comportamento de amortecimento do que o filtro puramente indutivo do tipo L. Este filtro fornece boa atenuação, porém apresenta pico na frequência de ressonância. O filtro L é melhor para aplicações em altas frequências de chaveamento devido a sua menor atenuação. O filtro LC, por ser de segunda ordem e possuir atenuação de -40db/dec, tem melhores resultados de amortecimento para menores frequências de chaveamento se comparado com o filtro L (Kahlane; Hassaine; Kherchi, 2014).

Do ponto de vista do módulo de potência, várias topologias podem ser adotadas, tais como: trifásico com quatro pernas; trifásico com três pernas; trifásico com quatro pernas e barramento CC dividido; monofásico em ponte H; monofásico em ponte H com transformador elevador; monofásico em ponte H com conversor CC/CC (GUIMARÃES, 2018). Neste trabalho, a topologia utilizada para o módulo de potência CFR será o trifásico com três pernas com um filtro LC, conforme ilustra a Figura 2.4.

Figura 2.4 – Topologia Trifásica com Três Pernas



Fonte: Meersman et al. (2010)

Na Figura 2.4, V_{CC} é a tensão do barramento CC fornecida pelo sistema de armazenamento; $S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6$, são as seis chaves eletrônicas, que podem ser MOSFETs ou IGBTs; L_f e C_f são, respectivamente, o indutor e o capacitor do filtro LC; V_{ab}, V_{bc} e V_{ca} são as tensões trifásicas fornecidas pelo inversor.

2.5 Classificação e Controle de Conversores

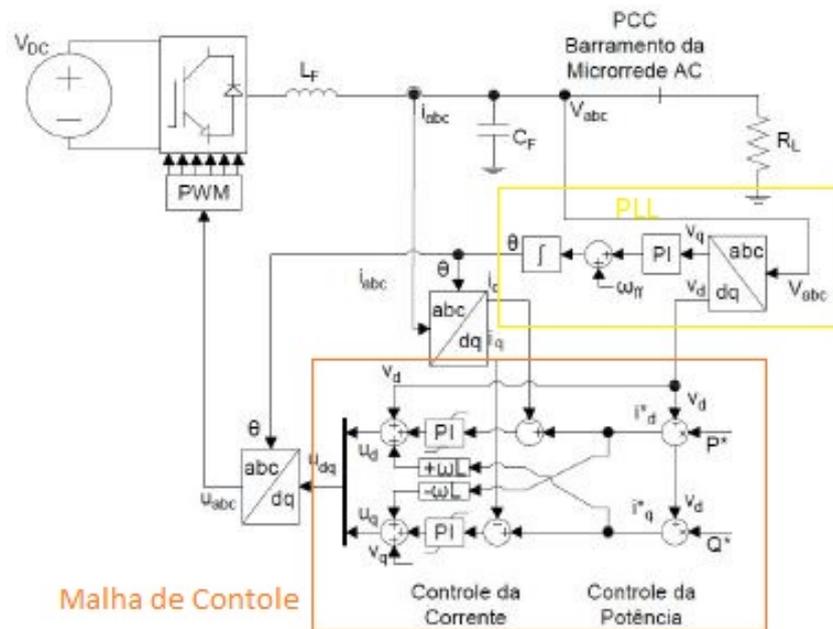
2.5.1 Conversor Alimentador de Rede - CAR

Esse conversor possui como referências de controle as potências ativa e reativa. Por isso, geralmente é modelado como fonte de corrente com alta impedância de saída, sendo indicado para o uso em paralelo com outros conversores em modo conectados à rede (ARAUJO, 2017). Para o controle do conversor são utilizadas soluções baseadas em controle PI no sistema de referência síncrona (ROCABERT et al., 2012). A operação do CAR é regulada por um controlador de alto nível MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) que define os valores de referência para a potência ativa e reativa do sistema.

Na Figura 2.5 é possível observar a malha de controle do CAR como fonte de corrente. As referências de corrente i_d^* e i_q^* são obtidas pela divisão das potências de referência (P^* e Q^*) pela tensão de eixo direto (v_d). Essa etapa está apresentada no diagrama como “Controle de Potência”.

O bloco em amarelo, denominado de PLL (*Phased Locked Loop*), é um algoritmo de sincronismo utilizado para gerar referência de fase para a malha de controle. A saída do PLL

Figura 2.5 – Conversor Alimentador de Rede como Fonte de Corrente



Fonte: Rocabert et al. (2012)

é o ângulo fase θ e é entregue como referência de fase para geração do sinal U_{abc} , impedindo que o sinal não esteja defasado em relação à rede.

O bloco denominado malha de controle, possui como referências de entrada a potência ativa P^* e a potência reativa Q^* . A referência de potência fornecida a malha garante um controle nas correntes de eixo direto (I_d) e de eixo de quadratura (I_q), garantindo que o sistema entregue a potência requisitada pelo sistema de cargas.

2.5.2 Conversor de Suporte à Rede - CSR

Quando ocorre alteração na rede, como conexão ou desconexão de cargas e outras fontes de geração distribuída, é natural que a tensão da microrrede ou da rede elétrica seja perturbada por distúrbios ou tenha problemas de regulação de tensão. A presença de um Conversor de Suporte à Rede - CSR contribui de forma positiva para a minimização desses problemas (RO-CABERT et al., 2012).

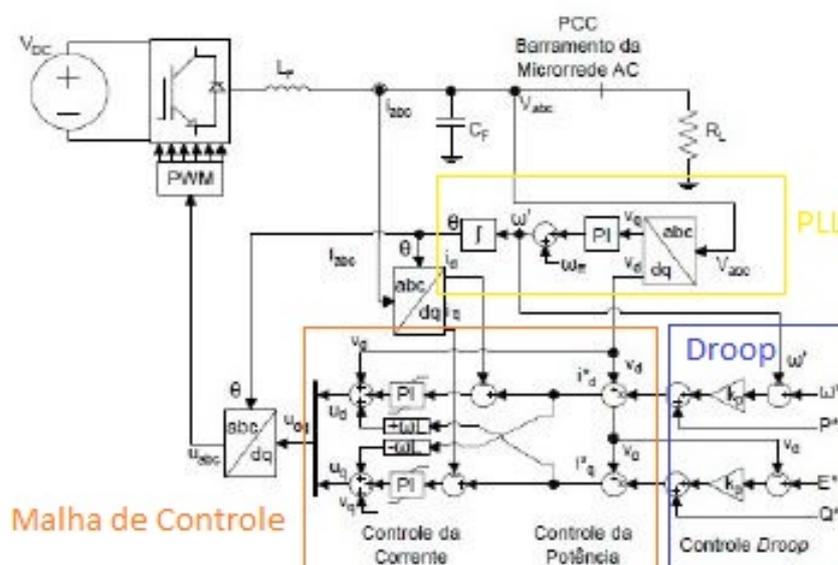
O CSR pode ser controlado como fonte de corrente ou como fonte de tensão, com o principal objetivo de participar na regulação da amplitude de tensão e da frequência da rede elétrica. Para isso, este conversor ajusta sua corrente e tensão de saída próximos de seus valores nominais, controlando a potência ativa e reativa fornecida à rede (PATRAO et al., 2017).

O objetivo principal do CSR não é apenas fornecer toda a potência disponível na fonte geração distribuída, mas deve também contribuir para regular a amplitude da tensão e frequência da rede principal e da microrrede. A principal diferença deste controle para o controle do CAR (FIGURA 2.5) é que a referência de corrente i_d^* é obtida visando regular a frequência (ω^*) e a potência ativa (P^*), enquanto a referência de corrente i_q^* é obtida para regular a amplitude da tensão (E^*) e a potência reativa (Q^*).

O bloco em azul, denominado de *droop*, fornece as referências de tensão de eixo direto e de quadratura para a malha de controle. As referências de entrada desse bloco, são ω^* , E^* , P^* e Q^* . Basicamente, o controle droop atua para compensar o desvio de frequência e melhorar a estabilidade do sistema, controlando a potência ativa a ser fornecida em função da variação da frequência da tensão, permitindo que a potência seja ajustada proporcionalmente à variação da frequência percebida da rede elétrica (ARAUJO, 2017).

Quando o CSR atua como fonte de corrente, Figura 2.6, tem como objetivo regular a amplitude da tensão e a frequência da rede principal e da microrrede, controlando a potência ativa e reativa do sistema. Quando o CSR atua como fonte de tensão, seu comportamento é similar a uma fonte de tensão CA conectada à rede através de uma impedância virtual. Da mesma forma, participa na regulação da amplitude de tensão e frequência, em ambos modos de operação da microrrede, sem necessidade de receber referência de tensão de outro conversor (ROCABERT et al., 2012).

Figura 2.6 – Conversor de Suporte à Rede como Fonte de Corrente



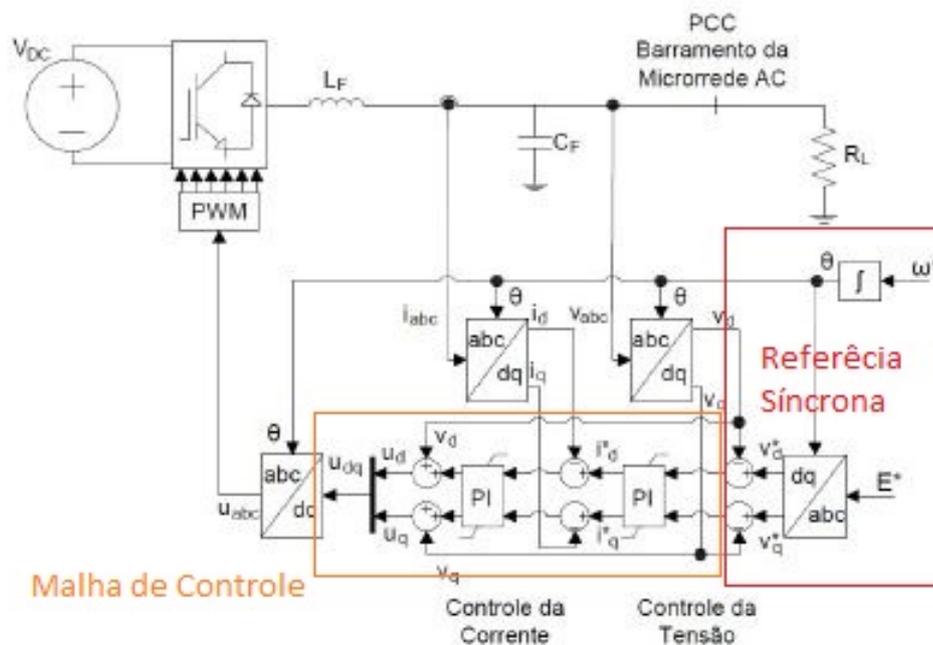
Fonte: Rocabert et al. (2012)

2.5.3 Conversor Formador de Rede - CFR

O Conversor Formador de Rede - CFR pode ser representado como uma fonte ideal de tensão CA com uma impedância de saída baixa, definindo a amplitude de tensão e a frequência da rede local usando uma malha de controle adequada. Em modo ilhado, o CFR deve ser alimentado por um banco de baterias ou por uma fonte externa estável (ROCABERT et al., 2012).

O sistema de controle mais comumente utilizado nas literaturas para o CFR são os controladores PI no sistema de referência síncrona. As entradas para o controle desse sistema são a amplitude da tensão, E^* , e a frequência a ser formada pelo conversor, ω^* no ponto de acoplamento comum (PCC), conforme ilustra a Figura 2.7. Geralmente, a estrutura de controle é composta de duas malhas, sendo a malha externa responsável pela regulação da tensão de saída, onde o erro é a entrada para um controlador cuja saída estabelece referência para a corrente a ser injetada no conversor. O restante do controle é semelhante ao realizado para o CAR. Tal circuito de controle só é habilitado se a microrrede estiver desconectada da rede principal (ROCABERT et al., 2012).

Figura 2.7 – Conversor Formador de Rede como Fonte de Tensão



Fonte: Rocabert et al. (2012)

O bloco em vermelho, denominado de referência síncrona, tem como função fornecer parâmetros de referência para as tensões de eixo direto e de quadratura, respectivamente V_d^* e V_q^* , que são fornecidas para a malha de controle de tensão e corrente. Como referência de

entrada para o bloco são passados a frequência ω^* e a amplitude da tensão E^* a ser entregue pelo conversor.

Apesar de o controlador PI na referência síncrona ser um dos mais utilizados na literatura, existem algumas limitações e dificuldades quando comparados com técnicas de controle modernas. Rodriguez et al. (2013) analisaram o controle PI com o controle preditivo e relataram algumas vantagens do MPC - Model Predictive Control, como melhor desempenho e robustez.

Por outro lado, Gonzatti et al. (2014) propuseram resolver os problemas de ressonância comumente presentes nas malhas de controle PI mantendo CFR com seu controle PI tradicional, porém com uma filtragem em paralelo L, LC ou LCL instalada para compensação de distúrbios.

2.5.3.1 Método de controle para CFR operando em modo ilhado

O método tradicional mais utilizado é o controlador linear PI (Proporcional-Integral) no sistema de referência síncrona. Quanto as malhas de controle podemos destacar a malha de controle de potência ativa e reativa, de controle de potência, tensão e frequência e controle de tensão e frequência.

Segundo Aguero et al. (2017), em um sistema operando em modo ilhado se faz necessário o uso de um sistema de controle que crie referência de tensão e frequência para a microrrede. Já uma microrrede operando conectada à rede toma como referência de tensão e frequência às fornecidas pela própria rede. Esse sistema, em modo ilhado, precisa de um controle preciso de referência de tensão e frequência, assim, as malhas de controle definidas nesse trabalho para o conversor formador de rede devem garantir tal exigência do sistema.

A malha de controle utilizando o controlador PI para um CFR é exemplificada em um artigo de Rocabert et al. (2012). Os parâmetros de entrada para a malha de controle com filtro LC são a tensão de referência E^* e a frequência ω^* . Os parâmetros são transformados para a referência síncrona, saindo do eixo abc para o eixo dq , onde um sinal de três componentes e alternados pode ser representado com auxílio de transformações matemáticas em um sinal de duas componentes e contínuos, V_d^* e V_q^* , tensão de eixo direto e tensão de eixo de quadratura, respectivamente. Essas duas componentes no eixo dq carregam todas as informações do sinal original.

Em um sistema tipicamente indutivo, para controlar o fluxo de potência ativa deve se controlar a defasagem entre as fontes, já para o controle da potência reativa deve-se controlar a amplitude entre as fontes. O CFR baseia seu controle no referencial síncrono. Para gerar a

referência de entrada utiliza-se uma referência trifásica e realiza-se a transformação para o referencial síncrono. Dessa forma, é possível gerar a referência de tensão do ponto de acoplamento comum - PCC no eixo direto e de quadratura (ROCABERT et al., 2012).

Os controladores PI trabalham para que o valor do erro, diferença entre variável medida e controlada, assuma valor bem próximo de zero. Os ganhos, proporcional e integral, trabalham em conjunto para manter esse erro próximo de zero, idealmente. Com base nas referências, o conversor formador de rede, deve gerar uma tensão com frequência e amplitude controladas e que sigam as referências estipuladas para alimentar diversos tipos de cargas conectadas à esse sistema.

O esquema de controle para este conversor é composto de dois circuitos de controle em cascata no referencial síncrono, um controlador de tensão de malha externa e um controlador de corrente interno. O controlador de malha externa fornece referência de corrente para o controlador interno. A frequência, ω^* é determinada pelo PLL (*Phased Locked Loop*), que são circuitos que fornecem referência de frequência em fase com o sinal de entrada.

A tensão trifásica é transformada para o referencial síncrono dq e o ângulo de fase é controlado por uma malha de controle que regula a componente q da tensão em zero. Esse ângulo de fase é utilizado nas transformadas de referencial, garantindo que tensão trifásica gerada tenha a mesma frequência da rede. Como o CFR opera isolado da rede, a referência de entrada da PLL são três ondas senoidais que simulam o comportamento da rede.

Dessa forma, a malha total fornece um sinal de referência para a modulação por largura de pulsos, PWM. Essa referência é fornecida para o inversor, controlando o chaveamento para que seja gerado um sinal trifásico com frequência e amplitude controlada e com as referências fornecidas, E^* e ω^* .

2.5.3.2 Técnica de Sintonia de Controladores

A modelagem do conversor é necessária para auxiliar no projeto do controlador que, em malha fechada, garantirá que a variável de saída desejada permaneça nos valores especificados no sinal de referência. O modelo do conversor é uma função de transferência que representa o sistema a ser controlado, isto é, a variação que a variável de saída assume para variações da variável de entrada, e deve representar a resposta dinâmica e em estado estacionário da variável (ARAUJO, 2017).

Uma possível modelagem para o conversor formador de rede e para o controlador dessa aplicação são apresentadas em Araujo (2017) e Antunes, Silva e Filho (2016). Todo o controle do CFR é feito no sistema de coordenadas dq, utilizando controladores do tipo proporcional integral.

Um método para a sintonia de controladores em cascata é apresentada por (GODOY, 2014), onde a sintonia deve ser feita na malha interna primeiro e, em seguida, na malha externa. Como a malha externa fornece o sinal de referência para a malha interna, é desejável que a malha externa tenha uma convergência mais rápida que a malha interna. Logo, o ganho proporcional da malha externa deve ser maior que o ganho proporcional da malha interna. Esse fato faz com que a malha externa chegue a referência mais rápido que a malha interna.

O CFR é o conversor responsável por manter estável a tensão CA da microrrede, com valores específicos de amplitude e frequência para que os outros conversores consigam realizar o sincronismo e efetuar seus próprios controles locais corretamente. Portanto, a variável que se deseja controlar (variável de saída) é a tensão de saída do CFR, isto é, a tensão no capacitor C_f . E, para manter a variável de saída no valor desejado, controla-se a razão cíclica dos interruptores eletrônicos, através da tensão de controle, que é fornecida pelo controlador (variável de controle) (ARAUJO, 2017).

A estratégia de controle de tensão do CFR é medir a tensão no capacitor C_f através de um transdutor de tensão, desconsiderando sua dinâmica, e comparar com a referência de tensão senoidal E^* , que gera um sinal de erro. O sinal de erro é levado ao controlador que fornece a tensão de modulação, V_{ref} . O controlador deve manter uma tensão senoidal e de baixa distorção harmônica, seguindo a referência E^* , na saída do filtro LC para as situações de funcionamento da microrrede.

Para os conversores desse trabalho são usados o controle em malha fechada com a técnica de modulação por largura de pulso - PWM. Considera-se para esse modelo que a frequência de chaveamento é muito maior que a frequência de corte do filtro LC, tornando se razoável para a modelagem do sistema.

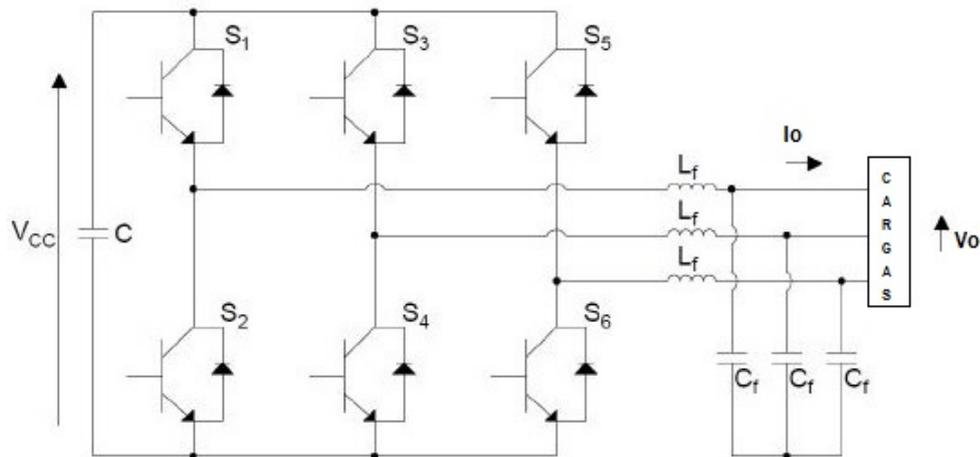
3 METODOLOGIA

Para validar a aplicação do controle linear PI na referência síncrona nos CFRs são elaboradas simulações no *software* MATLAB/Simulink. Todos os diagramas da simulação são apresentados no APÊNDICE A. Os testes consistem em analisar a capacidade do CFR em manter a tensão e a frequência de referência na presença cargas lineares R e RL variantes no tempo.

3.1 Descrição do sistema

Como se trata de um sistema que irá operar em modo ilhado, a alimentação do conversor deve acontecer por meio de um banco de baterias ou fonte CC estável. A topologia a ser utilizada nesse conversor é a trifásica como três ramos e filtro LC. São utilizados seis semicondutores para o chaveamento da tensão. A topologia utilizada pode ser vista na Figura 3.1. Foi escolhida a filtragem com passa-baixa LC por apresentar bom amortecimento e atenuações para o chaveamento, sendo o filtro mais indicado para conversores modelados como fonte de tensão.

Figura 3.1 – Topologia do CFR com filtro LC



Fonte: adaptado de Meersman et al. (2010)

O sistema é composto por uma fonte CC de 380V (V_{CC}) que simula o banco de baterias. Evidentemente, é preciso ocorrer uma transformação CC/CA, que é uma das responsabilidades do conversor formador de rede. Um sinal de referência é passado para o um PWM responsável por gerar os sinais de acionamento das chaves (S_n). As chaves utilizadas na simulação foram IGBTs com diodos de roda livre incorporados.

Os demais parâmetros utilizados neste trabalho são descritos na Tabela 3.1.

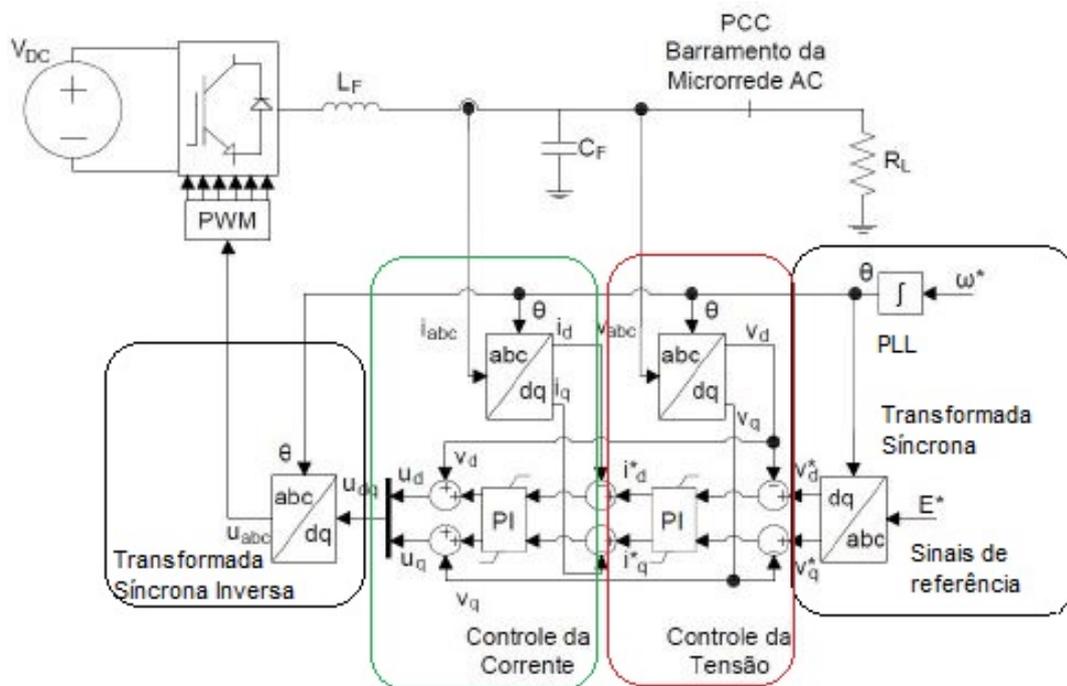
Tabela 3.1 – Parâmetros utilizados na simulação

Parâmetros	Valor
Tensão Nominal CA	127V
Frequência fundamental	60Hz
Frequência de chaveamento	6000Hz
Tensão DC	380V
Capacitância do filtro - C_f	20 μ F
Indutância do filtro - L_f	2.5 mH
Resistência da carga - R_L	20 Ω
Indutância da carga - L_L	53 mH

3.2 Malha de Controle do Conversor Formador de Rede

O controle do CFR é feito utilizando cascata de controladores PI, conforme descrito na sessão 2.5.3. Um esquemático da malha de controle implementada no MATLAB/Simulink é apresentado na Figura 3.2.

Figura 3.2 – Malha de controle de tensão e corrente para o CFR

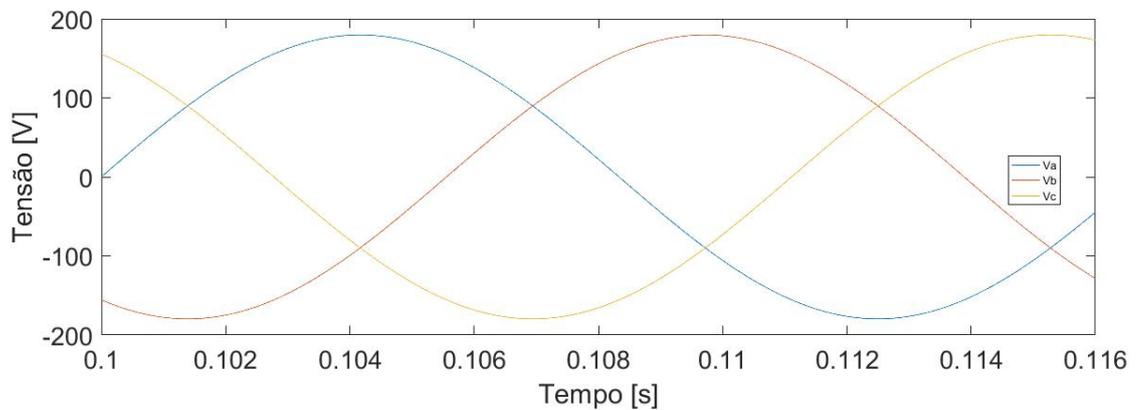


Fonte: Rocabert et al. (2012)

A primeira etapa para implementação da malha é a "obtenção dos sinais de referência", para tanto, foram definidos os valores de amplitude e frequência da tensão E^* e w^* , respectivamente.

O sinal de referência foi criado inicialmente no sistemas de coordenadas abc , e simula o comportamento de um sinal trifásico com amplitude e frequências predefinidas. Para tanto, foram gerados três sinais senoidais, com amplitude de 180V de pico (127V rms) e frequência de 60 Hz, conforme apresentado na Figura 3.3.

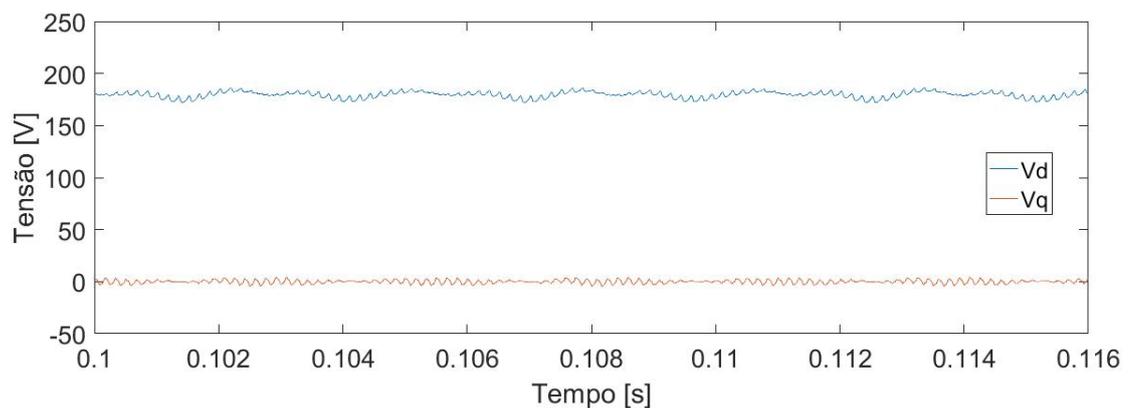
Figura 3.3 – Comportamento do sinal de referência eixo abc



Fonte: Do autor (2019).

Após gerar os sinais de referência no sistema de coordenadas abc , este deve passar por um PLL, para obtenção do ângulo de fase (θ). O ângulo θ é utilizado nas matrizes da referência síncrona como apresentado na seção 2.1. Após a transformação, são fornecidas as referências de tensão em dq para a etapa "controle da tensão". As tensões v_d^* e v_q^* são apresentadas na Figura 3.4.

Figura 3.4 – Comportamento do sinal de referência no eixo dq



Fonte: Do autor (2019).

Ainda na etapa “controle da tensão”, as tensões medidas na saída do conversor, já em dq (v_d e v_q), são comparadas com a referência e o erro alimenta um controlador PI. Observe que existem duas malhas de controle, uma de malha interna (controle da corrente) e a uma malha externa (controle da tensão), e ambas operam em cascata. Dessa forma, a função da malha de controle de tensão é gerar os sinais de corrente, i_d^* e i_q^* , que servirão de referência para a malha seguinte.

A etapa seguinte consiste no “controle da corrente”. Os sinais de corrente, i_d^* e i_q^* agora são a referência para essa malha de controle. A partir desses sinais, são gerados dois sinais U_d e U_q , para então ser feita a transformada síncrona inversa, obtendo o sinal U_{abc} que é a referência para a geração do sinal de PWM. Por sua vez, o sinal de PWM é aplicado as chaves (S_n) da Figura 2.4. Com o sinal de PWM corretamente fornecido, o conversor é capaz de realizar o chaveamento correto de suas chaves, gerando uma tensão e corrente senoidal trifásica de acordo com as referências de amplitude de tensão e frequência.

3.2.1 Sintonia de Controladores

O foco principal do presente trabalho está no desenvolvimento do conversor formador de rede, bem como o estudo e a validação do sistema proposto em simulação. Logo, a sintonia dos controladores é feita de acordo com dados apresentados na literatura para conversores semelhantes.

Os ganhos aplicados aos controladores, a modelagem do sistema e sintonia dos controladores é definida em Antunes, Silva e Filho (2016). Foram utilizados os ganhos apresentados pelos autores para a sintonia dos controladores conforme consta a Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Ganhos apresentado por Antunes, Silva e Filho (2016) para os controladores da malha de tensão e de corrente

Malhas	Ganhos	
Corrente	$K_{p_i} = 0.37$	$K_i = 1125.1$
Tensão	$K_{p_v} = 1.87$	$K_i = 193.02$

Como sugestão para trabalhos futuros será desenvolvida modelagem e técnica para sintonia de controladores em cascata para conversores formadores de rede em modo ilhado na topologia trifásica com três pernas e com filtro LC no ponto de acoplamento comum.

3.3 Simulação

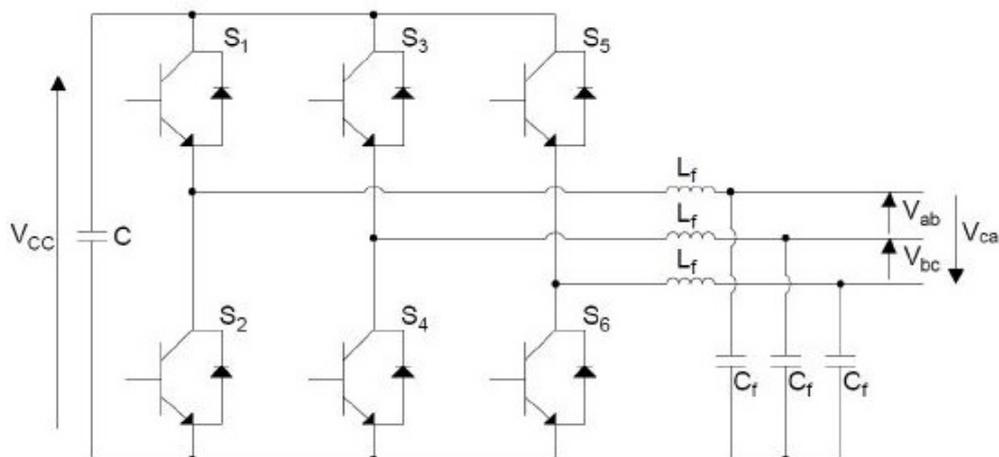
Para validar a malha de controle implementada, o CFR foi avaliado em três condições: operando a vazio, alimentado cargas puramente resistivas e alimentando cargas resistivas indutivas.

Neste trabalho não serão simuladas cargas não lineares, ou seja, que possuem correntes harmônicas (com forma de ondas não senoidais). Isso porque a malha de controle utilizada é projetada para atuar apenas na frequência fundamental (60Hz). Essas avaliações poderão ser discutidas em trabalhos futuros.

3.3.1 Caso A: operação a vazio e erros dos controladores

Neste caso não existe carga aplicada na saída do conversor e serão medidas as condições do conversor formador de rede com referências de corrente quase nulas. Logo, o foco principal está na análise da tensão gerada. A compensação de queda de tensão não é necessária e o sistema deve apresentar uma tensão chaveada e modulada porém que siga a tensão descrita na Figura 3.3. A topologia considerada para a operação nesse modo é mostrada na Figura 3.5, onde V_{CC} é a tensão DC do banco de baterias, S_n as chaves, L_f a indutância do filtro, C_f é a capacitância do filtro, V_{ab} , V_{bc} e V_{ca} são as tensões de linha operando à vazio.

Figura 3.5 – Topologia do CFR com filtro LC operando à vazio



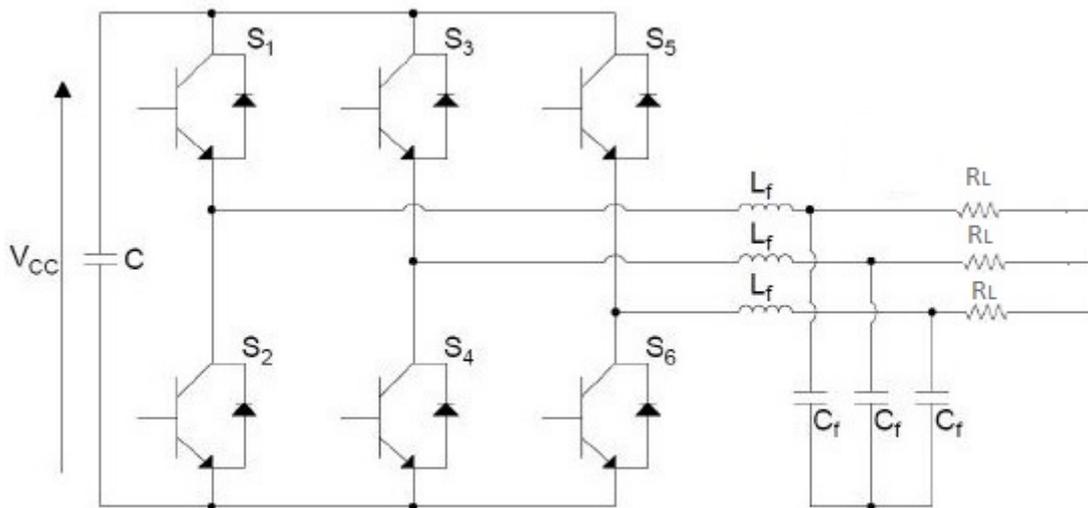
Fonte: adaptado de Meersman et al. (2010)

3.3.2 Caso B: carga puramente resistiva

O sistema simulado com cargas puramente resistivas é apresentado na Figura 3.6, onde R_L é a resistência da carga, para este caso, 20Ω ligada em estrela (Y) e com potência ativa, em torno de 1394 W. Essa análise tem por objetivo validar o funcionamento do CFR quando este é o único conversor da microrrede ilhada e é responsável por entregar potência ativa ao sistema e regular a tensão de saída.

A topologia considerada para a operação neste modo é mostrada na Figura 3.6, onde V_{cc} é a tensão DC do banco de baterias, S_n as chaves, L_f a indutância do filtro, C_f é a capacitância do filtro e R_L é a carga resistiva, ligadas em Y e conectadas a saída do conversor.

Figura 3.6 – Topologia do CFR com filtro LC e carga R



Fonte: adaptado de Meersman et al. (2010)

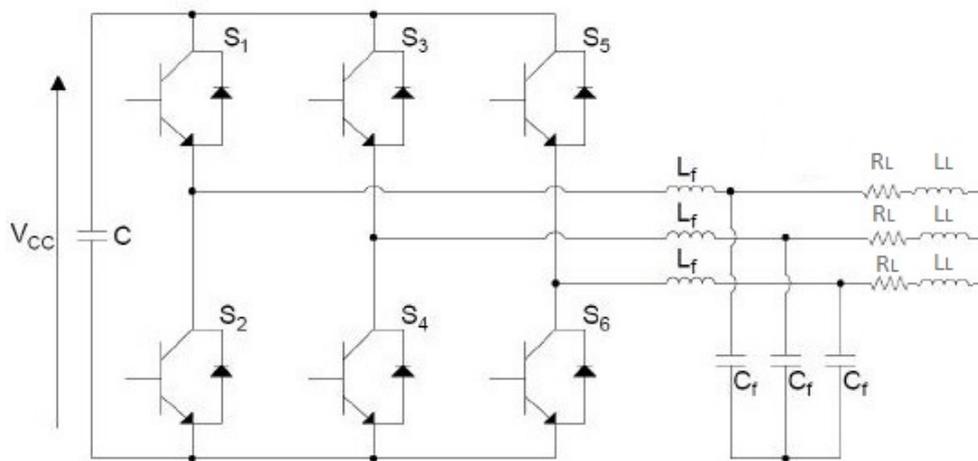
Para simular variações nas referências será aplicado um degrau de carga, injetando uma carga, em paralelo, puramente resistiva idêntica a simulada com R_L de 20Ω . O sinal de tensão sentirá os distúrbios, porém o sistema de controle deve fazer com que o sinal de tensão gerado pelo conversor volte a se tornar estável.

As formas de ondas da corrente sofrerá alterações, uma vez que o acréscimo de cargas no sistema faz com que a demanda de potência aumente, logo a corrente tende a aumentar seu pico para compensar essa nova demanda de potência.

3.3.3 Caso C: carga resistiva indutiva

A topologia para o CFR com cargas resistivas indutivas (RL) ligadas à saída é apresentado na Figura 3.7. A simulação de tal carga permite analisar o comportamento do sistema e verificar o impacto na regulação de tensão causada pela injeção da carga RL. Para esse caso, foram utilizados $R_L = 20\Omega$ e $L_L = 53$ mH, ligadas em estrela (Y) e com potência ativa (P) em torno de 1396 W, reativa (Q), em torno de 805 VAR e aparente (S), em torno de 1609 VA.

Figura 3.7 – Topologia do CFR com filtro LC e carga RL



Fonte: adaptado de Meersman et al. (2010)

Onde V_{cc} é a tensão DC do banco de baterias, S_n as chaves, L_f a indutância do filtro, C_f é a capacitância do filtro, R_L e L_L são a resistência e indutância da carga, respectivamente.

Para simular variações nas referências será aplicado um degrau de carga injetando uma carga resistiva indutiva com R_L e L_L de 20 Ω e 53 mH, respectivamente. O sinal de referência deve apresentar distúrbios, porém o sistema de controle deve fazer com que o sinal de tensão gerado pelo conversor fique estável. Além do mais, a regulação de tensão deve apresentar melhor regulação de que o caso anterior.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com objetivo de validar o controle linear PI em referência síncrona foram simulados em software Matlab/Simulink para os casos A,B e C, descritos abaixo.

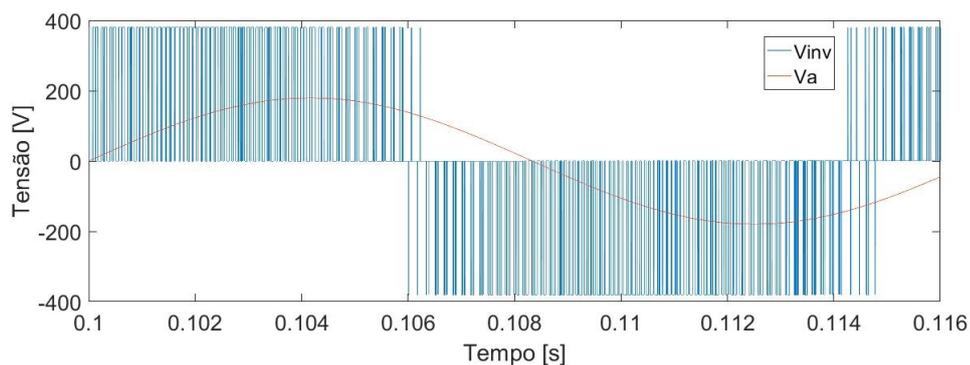
- A- será monitorado o comportamento das tensões e correntes do CFR operando à vazio;
- B- será monitorado o comportamento das tensões e correntes do CFR com carga resistiva - R, acoplada ao PCC;
- C- será monitorado o comportamento das tensões e correntes do CFR com carga resistiva indutiva - RL, acoplada ao PCC;

Para que o modelo proposto seja satisfatório é preciso que para todos os casos o sistema siga a referência em amplitude de tensão e frequência de oscilação.

4.1 Caso A: operação à vazio

A Figura 4.1 apresenta a tensão fornecida pelo conversor à vazio, V_{inv} , que se comporta como um sinal modulador e chaveado. A tensão V_a é a tensão de fase neutro fornecida pela referência, conforme descrito na secção 3.2.

Figura 4.1 – Comportamento da tensão fornecida pelo inversor operando à vazio

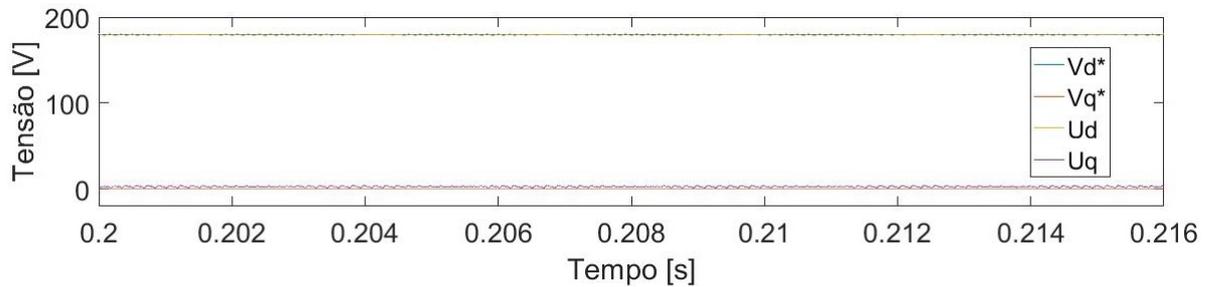


Fonte: do autor.

A Figura 4.2 apresenta um comparação entre as tensões no eixo dq, fornecidas como referência, V_d^* e V_q^* com as tensões U_d e U_q , as quais são as tensões fornecidas como referência para a transformada síncrona inversa e posteriormente fornecida ao PWM.

É possível notar que as tensões fornecidas acompanham a referência estabelecida, logo, pode-se concluir que o sistema responde de forma satisfatória para a criar referência de amplitude de tensão, mesmo com o sistema operando a vazio.

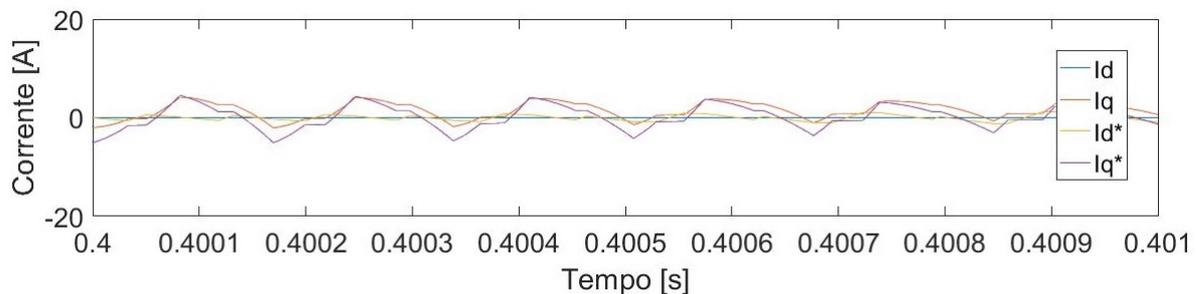
Figura 4.2 – Comportamento da tensão no eixo dq fornecida pelo inversor operando à vazio



Fonte: do autor.

O comportamento da corrente operando a vazio deve convergir para algum valor próximo a zero, pois, uma vez que o sistema opera sem carga a corrente será idealmente nula. As correntes I_d^* e I_q^* são as referências oriundas da malha de controle de tensão fornecidas para a malha de corrente. I_d e I_q expressam o comportamento da corrente fornecida pelo inversor. O comportamento dos sinais das correntes podem ser analisados na Figura 4.3.

Figura 4.3 – Comportamento da corrente no eixo dq fornecida pelo inversor operando a vazio



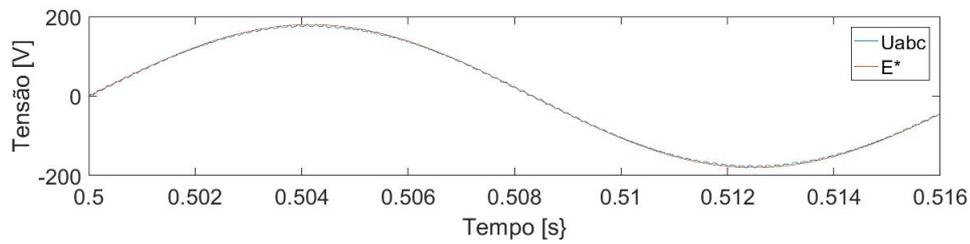
Fonte: do autor.

Idealmente os sinais de corrente deveriam convergir para zero, porém existem oscilações nesses sinais provocadas pelas componentes harmônicas resultantes do chaveamento do conversor. Mesmo com essas oscilações os sinais acompanham as referências.

A Figura 4.4 apresenta o comportamento da tensão trifásica após filtragem fornecida pelo inversor, U_{abc} operando a vazio. O sistema é capaz de fornecer as referências de amplitude de tensão e frequência para o CFR em modo ilhado. O sinal alcança pico de 180V referente a 127 Vrms conforme fornece o sinal de referência E^* . Os sinais encontram-se em fase, indicando que a frequência de referência, ω^* , também foi seguida.

De maneira geral, o sistema operando à vazio respondeu de forma satisfatória, gerando referência para a amplitude de tensão e frequência de oscilação do sinal.

Figura 4.4 – Comportamento da tensão fornecida pelo inversor operando à vazio

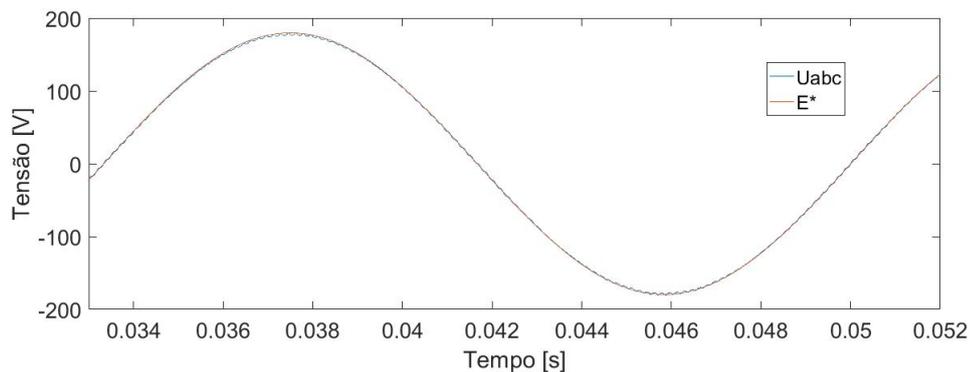


Fonte: do autor.

4.2 Caso B: carga puramente resistiva

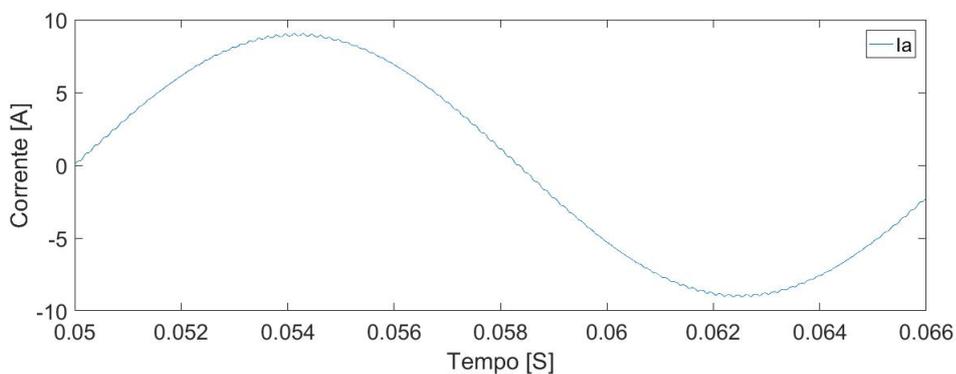
As Figuras 4.5 e 4.6 representam, respectivamente, o comportamento do sinal de tensão e corrente fornecidos pelo inversor para uma carga puramente resistiva. É notável que a amplitude da tensão chega a 180V de pico, o que representa uma tensão nominal de 127V.

Figura 4.5 – Comportamento da tensão fornecida pelo inversor com carga resistiva



Fonte: do autor.

Figura 4.6 – Comportamento da corrente fornecida pelo inversor com carga resistiva

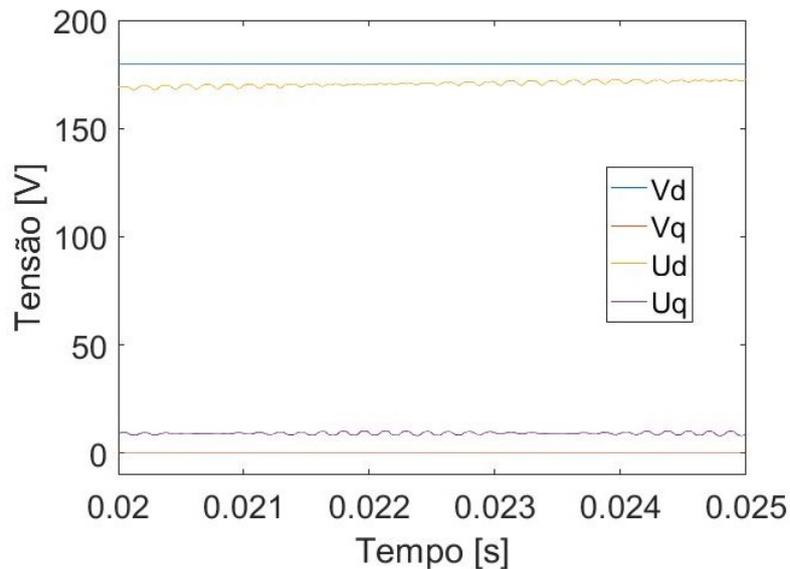


Fonte: do autor.

I_a representa o comportamento da corrente de fase neutro em uma das fases do conversor formador de rede.

A Figura 4.7 apresenta uma comparação entre as tensões no eixo dq, fornecidas como referência, onde V_d^* e V_q^* são as componentes síncronas de referência e U_d e U_q são as componentes síncronas das tensões fornecidas pelo inversor.

Figura 4.7 – Comportamento da tensão no eixo dq fornecida pelo inversor com carga resistiva



Fonte: do autor.

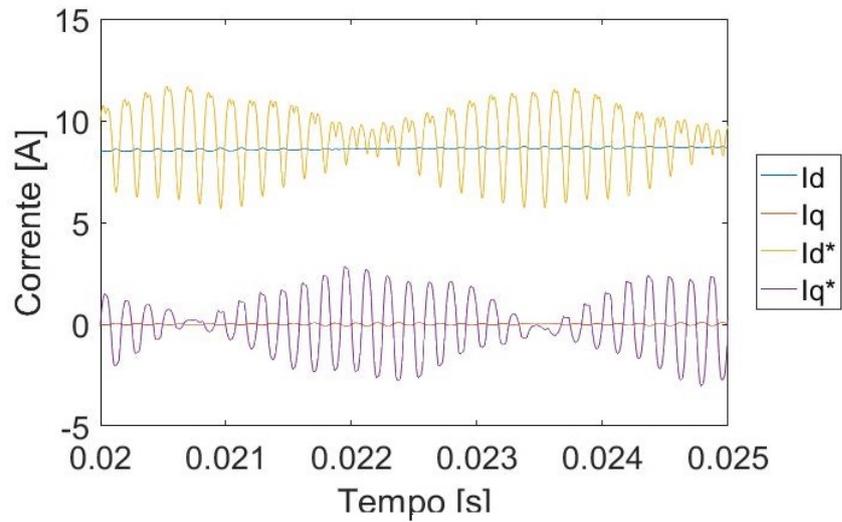
Pode-se perceber que o sinal U_d estabiliza-se abaixo da referência V_d e o sinal U_q estabiliza-se um pouco acima de sua referência V_q . Esse deslocamento é provocado pela alteração da demanda de potência com a injeção de carga no sistema e pelas componentes harmônicas presentes no sinal.

É possível notar que as tensões fornecidas pelo inversor acompanham a referência fornecida, logo, pode-se concluir que o sistema responde de forma satisfatória para criar referência de amplitude de tensão, com cargas puramente resistivas conectadas na saída.

O comportamento da corrente, no eixo dq, quando uma carga resistiva está conectada à saída do filtro, deve convergir para algum valor próximo a 10 A. As correntes, I_d^* e I_q^* são as referências oriundas da malha de controle de tensão fornecidas para a malha de corrente. I_d e I_q expressam o comportamento da corrente fornecida pelo inversor. O comportamento dos sinais das correntes podem ser analisados na Figura 4.8.

O sistema é capaz de fornecer as referências de amplitude de tensão e frequência para o CFR em modo ilhado. O sinal alcança pico de 180V, referente a 127 Vrms, conforme fornece o sinal de referência, E^* . Os sinais encontram-se em fase indicando que a frequência de referência, ω^* , também é seguida. O comportamento do sinal de tensão fornecido pelo inversor

Figura 4.8 – Comportamento da corrente no eixo dq fornecida pelo inversor com carga resistiva

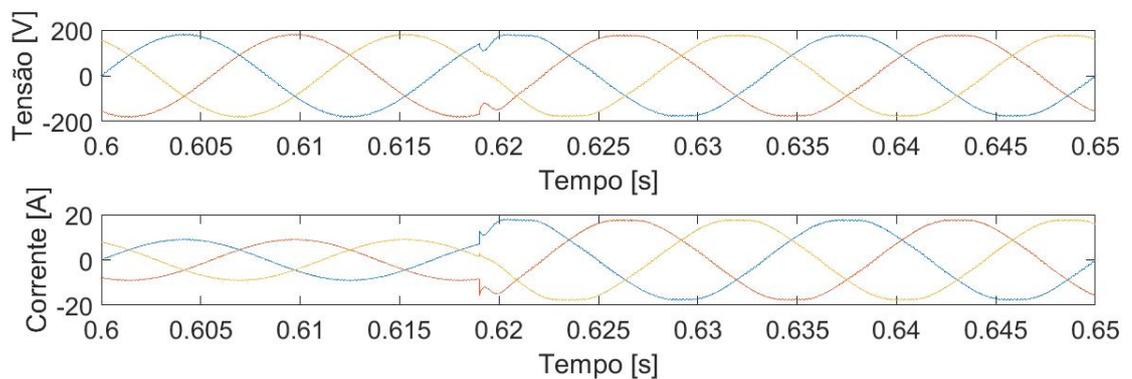


Fonte: do autor.

é comparado com o sinal de referência gerado pelas ondas senoidais. É possível perceber que o sinal fornecido pelo inversor acompanha a referência indicando que o sistema de controle proposto é satisfatório para a aplicação.

A Figura 4.9 apresenta o comportamento da tensão e corrente entregues pelo inversor quando acontece um degrau de carga no sistema, a tensão sente a oscilação porém o sistema se estabiliza novamente, mantendo a referência de amplitude de tensão em 180V de pico. A corrente aumenta sua intensidade no intuito de controlar a entrega de potência do sistema.

Figura 4.9 – Comportamento da tensão e corrente fornecida pelo inversor com distúrbio no sistema

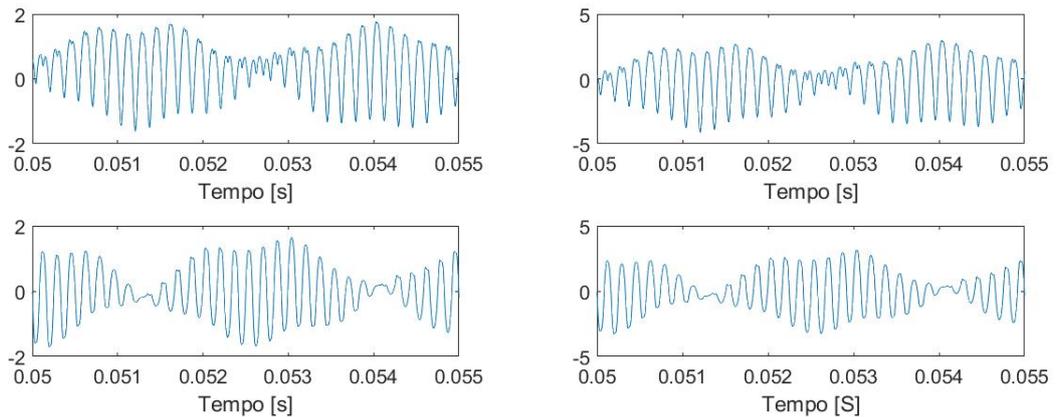


Fonte: do autor.

Levando em consideração que o sinal gerado como referência era uma onda trifásica senoidal de 60Hz com pico de tensão em 180V, o sistema respondeu satisfatoriamente ao controle proposto para cargas lineares puramente resistivas. Mesmo com um distúrbio provocado por

um degrau de carga, o sistema foi capaz de estabilizar e garantir que o conversor entregue uma onda com referência de tensão e frequência, para este caso 180V de pico e 60Hz, respectivamente. É possível afirmar que a frequência de referência é seguida pois os sinais de referência e os gerados pelo conversor estão em fase, indicando que oscilam com mesma frequência.

Figura 4.10 – Erros dos controladores



Fonte: do autor.

Os erros de cada controlador podem ser vistos na Figura 4.10. É possível perceber que os erros são levados para zero, ou tendem a oscilar em torno de zero. O erro é a diferença entre referência e variável medida, logo o controlador atua para que essa diferença seja nula, ou seja, para que a variável medida e de referência sejam iguais. Como os erros desse trabalho oscilam e tendem a convergir em zero, significa que o controlador linear PI atua de forma coerente, fazendo com que o conversor siga as referências de amplitude de tensão e frequência estabelecidos.

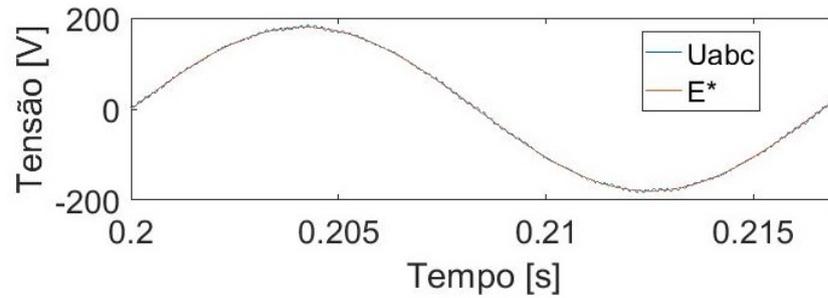
4.2.1 Caso C : carga resistiva indutiva

As Figuras 4.11 e 4.12 representam, respectivamente, o comportamento do sinal de tensão e corrente fornecido pelo inversor para uma carga resistiva indutiva. É notável que a amplitude da tensão chega a 180V de pico, o que representa uma tensão nominal de 127V. Também a referência de frequência foi seguida pois os sinais não apresentam defasagem.

A Figura 4.13 apresenta uma comparação entre as tensões no eixo dq, fornecidas como referência, onde V_d^* e V_q^* são as componentes síncronas de referência e U_d e U_q são as componentes síncronas das tensões fornecidas pelo inversor. É possível notar que as tensões fornecidas pelo inversor acompanham a referência fornecida, logo, pode-se concluir que o sistema res-

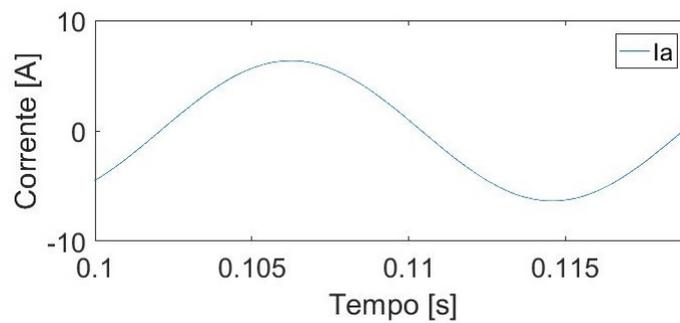
ponde de forma satisfatória para criar referência de amplitude de tensão, com cargas resistivas indutivas conectadas à saída.

Figura 4.11 – Comportamento da tensão fornecida pelo inversor para carga resistiva indutiva



Fonte: do autor.

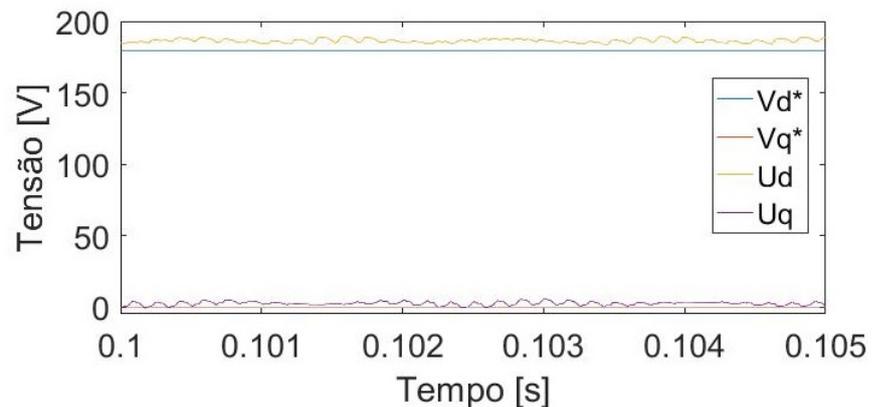
Figura 4.12 – Comportamento da corrente fornecida pelo inversor para carga resistiva indutiva



Fonte: do autor.

Onde a variável I_a representa a corrente de fase-neutro fornecida por uma das fases do inversor.

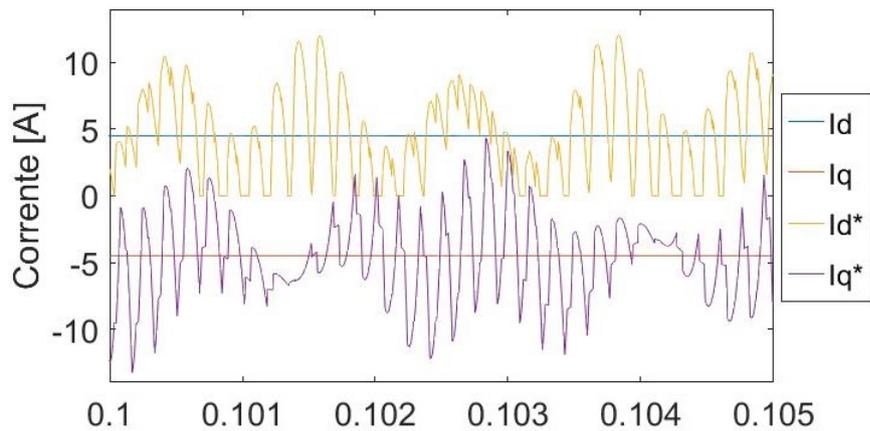
Figura 4.13 – Comportamento da tensão, no eixo dq fornecida pelo inversor com carga resistiva indutiva



Fonte: do autor.

O comportamento da corrente, no eixo dq, quando uma carga resistiva indutiva está conectada à saída do filtro, deve convergir para algum valor próximo a 5 A. As correntes, I_d^* e I_q^* são as referências oriundas da malha de controle de tensão fornecidas para a malha de corrente. I_d e I_q expressam o comportamento da corrente fornecida pelo inversor. O comportamento dos sinais das correntes podem ser analisados na Figura 4.14.

Figura 4.14 – Comportamento da corrente no eixo dq fornecida pelo inversor com carga resistiva indutiva

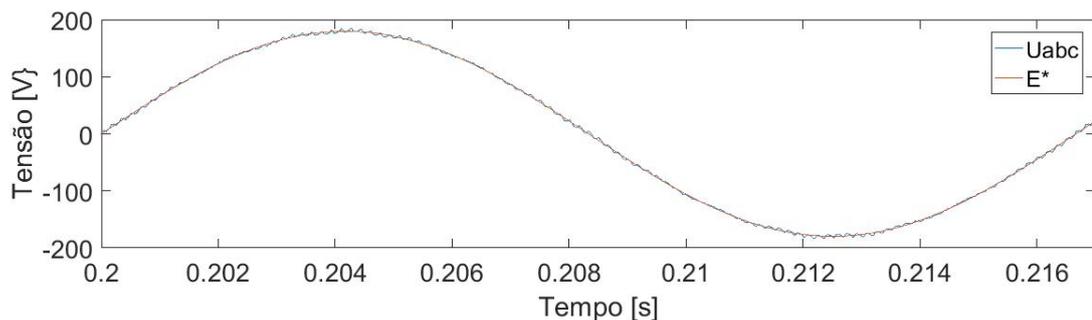


Fonte: do autor.

É possível notar que o sinal controlado oscila e apresenta harmônicos em sua composição. Grande parte desses distúrbios estão associadas características da carga. Como alternativa para melhorar o desempenho poderia ser realizada uma filtragem nas componentes síncronas antes de serem aplicadas à malha de controle de forma que o sinal carregue apenas informações da componente fundamental.

O acréscimo de filtros modifica a dinâmica do sistema, necessitando que todo o sistema seja remodelado e redefinido. A Figura 4.15, apresenta o comportamento da tensão trifásica após filtragem fornecida pelo inversor, U_{abc} com uma carga RL conectada à saída.

Figura 4.15 – Comportamento da tensão fornecida pelo inversor com carga resistiva indutiva

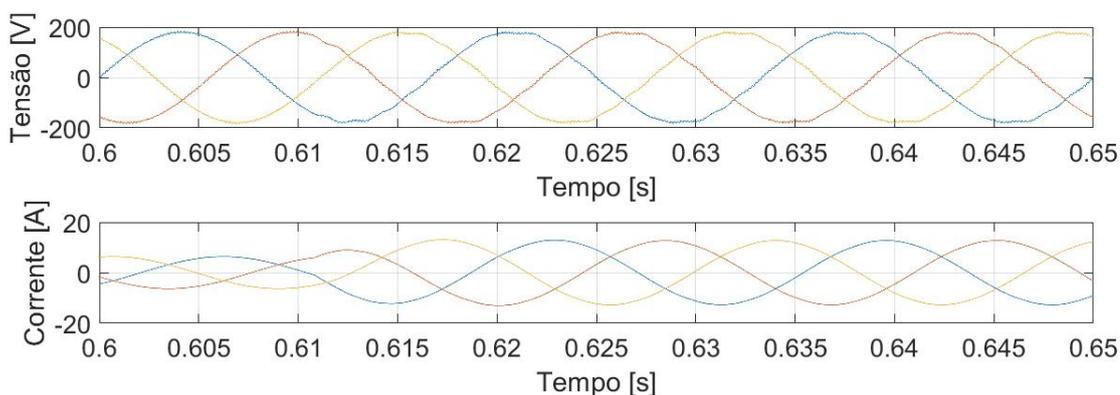


Fonte: do autor.

O sistema é capaz de fornecer as referências de amplitude de tensão e frequência para o CFR em modo ilhado. O sinal alcança pico de 180V, referente a 127 Vrms, conforme fornece o sinal de referência, E^* . Os sinais encontram-se em fase, indicando que a frequência de referência, ω^* também é seguida. O comportamento do sinal de tensão fornecido pelo inversor é comparado com o sinal de referência gerado pelas ondas senoidais. É possível perceber que o sinal fornecido pelo inversor acompanha a referência indicando que o sistema de controle proposto é satisfatório para a aplicação.

A Figura 4.16, apresenta o comportamento da tensão e corrente entregues pelo inversor quando acontece um degrau de carga no sistema, a tensão sente, ligeiramente, a oscilação porém o sistema se estabiliza novamente, mantendo a referência de amplitude de tensão em 180V de pico. A corrente aumenta sua intensidade no intuito de controlar a entrega de potência do sistema.

Figura 4.16 – Comportamento da tensão e corrente fornecida pelo inversor com distúrbio no sistema

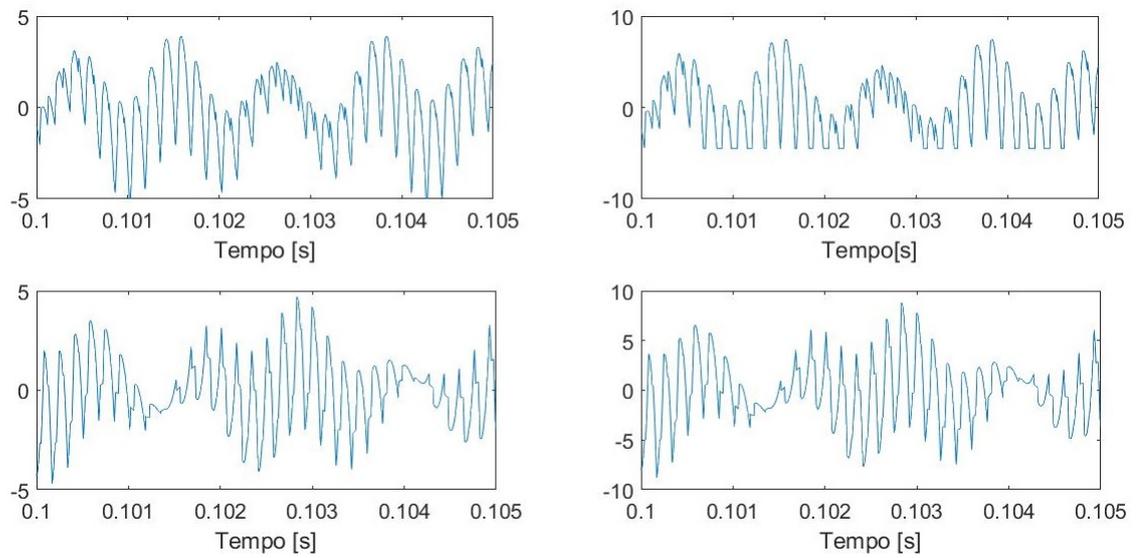


Fonte: do autor.

Os erros de cada controlador podem ser vistos na Figura 4.17. É possível perceber que os erros são levados para zero, ou tendem a oscilar em torno de zero. O erro é a diferença entre referência e variável medida, logo o controlador atua para que essa diferença seja nula, ou seja, variável medida e de referência são iguais. Como os erros deste trabalho oscilam e tendem a convergir em zero, significa que o controlador linear PI atua de forma coerente, fazendo com que o conversor siga as referências de amplitude de tensão e frequência pré setados.

O sistema respondeu satisfatoriamente ao controle proposto para cargas lineares resistivas indutivas. Mesmo com um distúrbio provocado por um degrau de carga, o sistema foi capaz de estabilizar e garantir que o conversor entregue uma onda com referência de tensão e frequência, para este caso 180V de pico e 60Hz, respectivamente. É possível afirmar que a frequência

Figura 4.17 – Erros dos controladores



Fonte: do autor.

de referência é seguida pois os sinais de referência e os gerados pelo conversor estão em mesma fase, indicando que oscilam com mesma frequência.

5 CONCLUSÕES

A malha de controle proposta para fornecer referência de tensão e frequência para microrrede operando em modo ilhado, apresentou resultados satisfatórios para os casos simulados. Ademais, verificou-se que tanto para uma carga puramente resistiva quanto para uma carga resistiva indutiva, o conversor formador de rede, com o auxílio da malha de controle de tensão e corrente, controlada pelos controladores lineares PI em cascata, foi capaz de fornecer referência de tensão e frequência para a microrrede em modo ilhado.

As tensões de referência e as fornecidas pelo conversor não apresentaram defasagem para os casos A, B e C, indicando que a frequência de oscilação ω^* de ambos os sinais estão em sincronia. Desconsiderando o regime transitório da resposta do conversor, a tensão gerada pelo mesmo seguiu a amplitude da tensão de referência.

Quando foi solicitado que a microrrede fornecesse mais potência, com um acréscimo de carga, a mesma respondeu satisfatoriamente, mantendo as referências de amplitude de tensão (E^*) e frequência (ω^*) estáveis. Dessa forma, as formas de onda das correntes fornecidas pelo conversor sofrem alteração, como defasagem e aumento de amplitude, por exemplo.

A sintonia de controladores em cascata não é trivial, pois uma pequena variação de ganhos em qualquer controlador da malha afeta toda resposta dinâmica deste sistema. O controle PI em referência síncrona proposto neste trabalho, para controlar um conversor formador de rede em uma microrrede ilhada, obteve resultados satisfatórios.

Para trabalhos futuros poderá ser aplicada uma filtragem nas componentes síncronas e remodelagem do sistema, com objetivo de melhorar regulagem de tensão e eliminação de harmônicos. Acrescentar a avaliação do desempenho do sistema proposto para cargas não lineares e outras cargas típicas.

REFERÊNCIAS

- AGUERO, J. R. et al. Modernizing the grid: Challenges and opportunities for a sustainable future. **IEEE Power and Energy Magazine**, v. 15, n. 3, p. 74–83, May 2017.
- ANTUNES, H. et al. A new configuration for a grid forming converter in ac islanded microgrid. In: **PCIM Europe 2017; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management**. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–8.
- ANTUNES, H. M. A.; SILVA, S. M.; FILHO, B. J. C. Análise e operação de uma microrrede de energia elétrica. **SBSE 2106 - Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos**, May 2016.
- ARAUJO, L. S. de. Controle de conversores em microrredes autônomas com sistemas de armazenamento distribuídos. **Dissertação de mestrado - Universidade Federal de Campinas**, 2017.
- DISHA et al. Synchronous reference frame based transformerless single phase grid tie inverter for dc bus power evacuation. In: **2016 IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information Communication Technology (RTEICT)**. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1752–1756.
- GODOY, R. J. C. de. Sintonia ótima de controladores. **Dissertação de mestrado - Universidade de São Paulo**, Jun 2014.
- GONZATTI, R. B. et al. Implementation of a grid-forming converter based on modified synchronous reference frame. In: **IECON 2014 - 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society**. [S.l.: s.n.], 2014. p. 2116–2121.
- GUERRERO, J. M. et al. Decentralized control for parallel operation of distributed generation inverters using resistive output impedance. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 54, n. 2, p. 994–1004, April 2007.
- GUIMARÃES, R. A. Controle preditivo baseado em modelo para conversores formadores de rede com operação ilhada. **Dissertação de mestrado - Universidade de Federal de Lavras**, 2018.
- HAO, M.; ZHEN, X. A control strategy for voltage source inverter adapted to multi — mode operation in microgrid. In: **2017 36th Chinese Control Conference (CCC)**. [S.l.: s.n.], 2017. p. 9163–9168.
- JAMIL, M. et al. Microgrid power electronic converters: State of the art and future challenges. In: **2009 44th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)**. [S.l.: s.n.], 2009. p. 1–5.
- Kahlane, A.; Hassaine, L.; Kherchi, M. Lcl filter design for photovoltaic grid connected systems. **Revue des Energies Renouvelables SIENR'14 Ghardaïa**, 2014.
- KOURO, S. et al. Model predictive control—a simple and powerful method to control power converters. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 56, n. 6, p. 1826–1838, June 2009.
- KUMAR, D.; ZARE, F.; GHOSH, A. Dc microgrid technology: System architectures, ac grid interfaces, grounding schemes, power quality, communication networks, applications, and standardizations aspects. **IEEE Access**, v. 5, p. 12230–12256, 2017.

LASSETER, B. Microgrids [distributed power generation]. In: **2001 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.01CH37194)**. [S.l.: s.n.], 2001. v. 1, p. 146–149 vol.1.

LEDE, A. M. R. et al. Microgrid architectures for distributed generation: A brief review. In: **2017 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference - Latin America (ISGT Latin America)**. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–6.

MEERSMAN, B. et al. Overview of three-phase inverter topologies for distributed generation purposes. In: **i-SUP 2010 : Innovation for Sustainable Production, Proceedings**. [S.l.: s.n.], 2010. p. 24–28.

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

PATRAO, I. et al. Synchronization of power inverters in islanded microgrids using an fm-modulated signal. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 8, n. 1, p. 503–510, Jan 2017.

PIAGI, P.; LASSETER, R. H. Autonomous control of microgrids. In: **2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting**. [S.l.: s.n.], 2006. p. 8 pp.–.

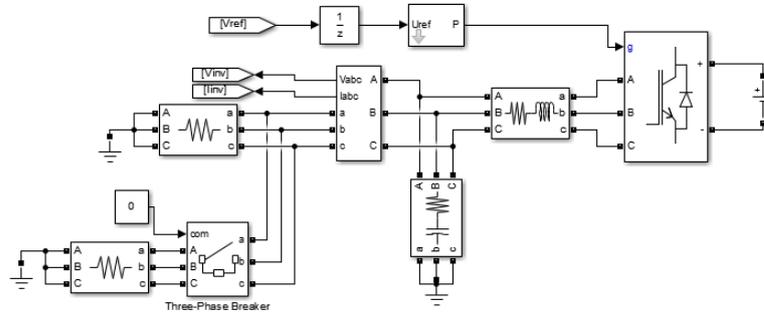
ROCABERT, J. et al. Control of power converters in ac microgrids. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 27, n. 11, p. 4734–4749, Nov 2012.

RODRIGUEZ, J. et al. State of the art of finite control set model predictive control in power electronics. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 9, n. 2, p. 1003–1016, May 2013.

SERGEJ, K.; ASIMINOAEI, L.; HANSEN, S. Harmonic detection methods of active filters for adjustable speed drive applications. In: **2009 13th European Conference on Power Electronics and Applications**. [S.l.: s.n.], 2009. p. 1–10.

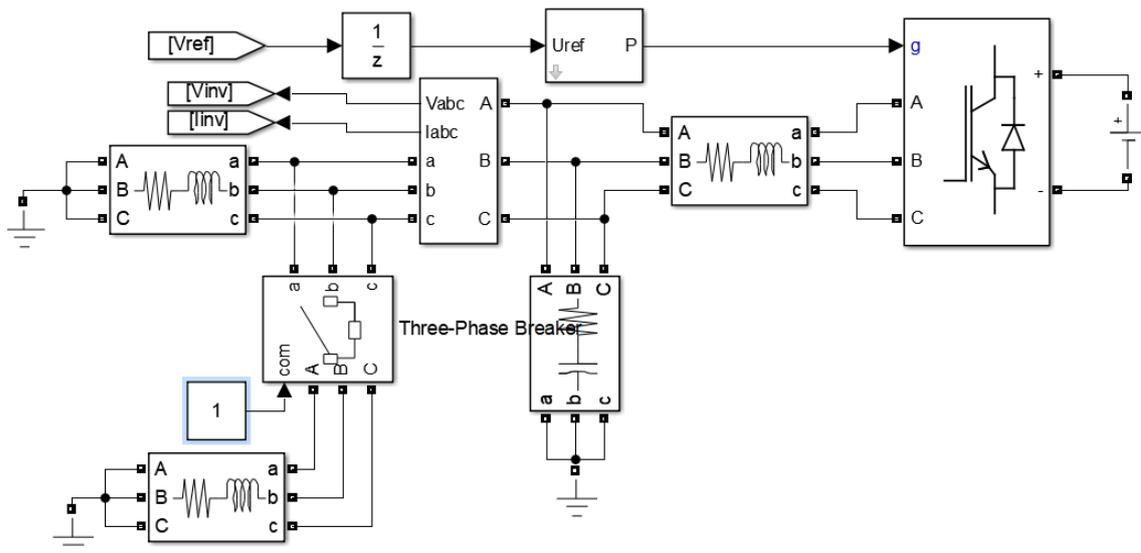
APÊNDICE A – Diagramas usados na simulação Matlab/Simulink

Figura 1 – Malha para microrrede operando em modo ilhado com carga R



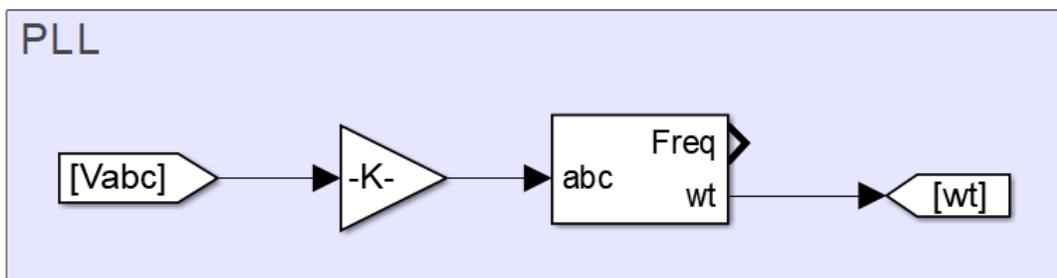
Fonte: do autor.

Figura 2 – Malha para microrrede operando em modo ilhado com carga RL



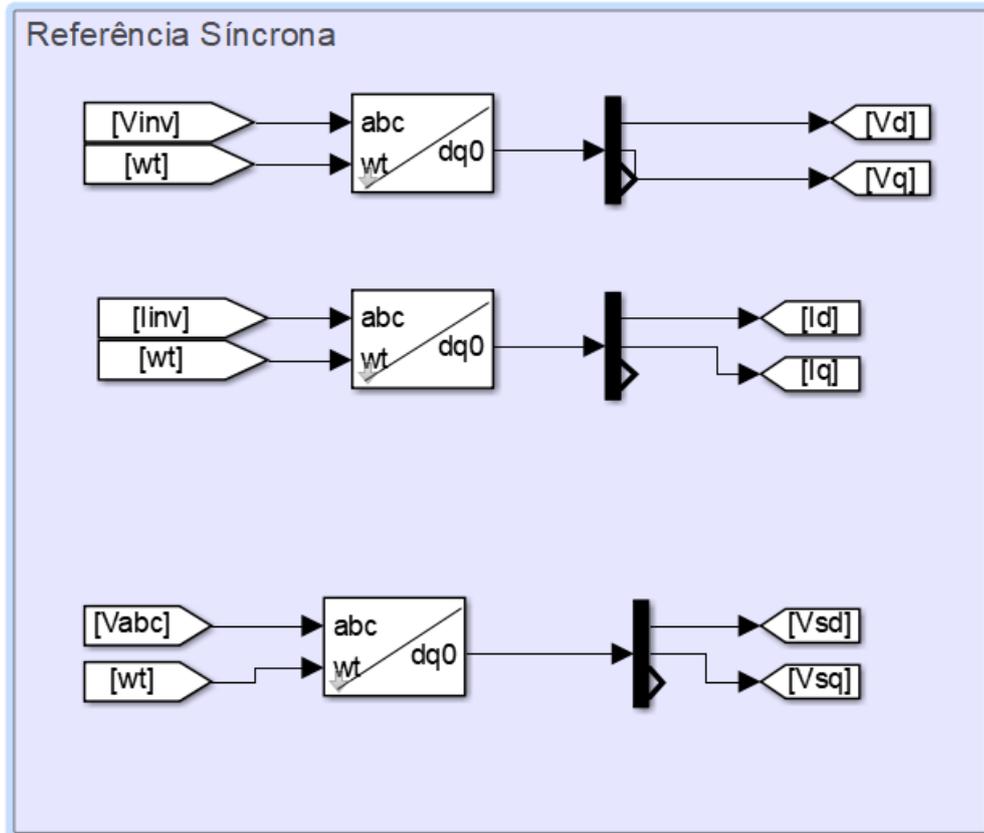
Fonte: do autor.

Figura 3 – Malha do PLL



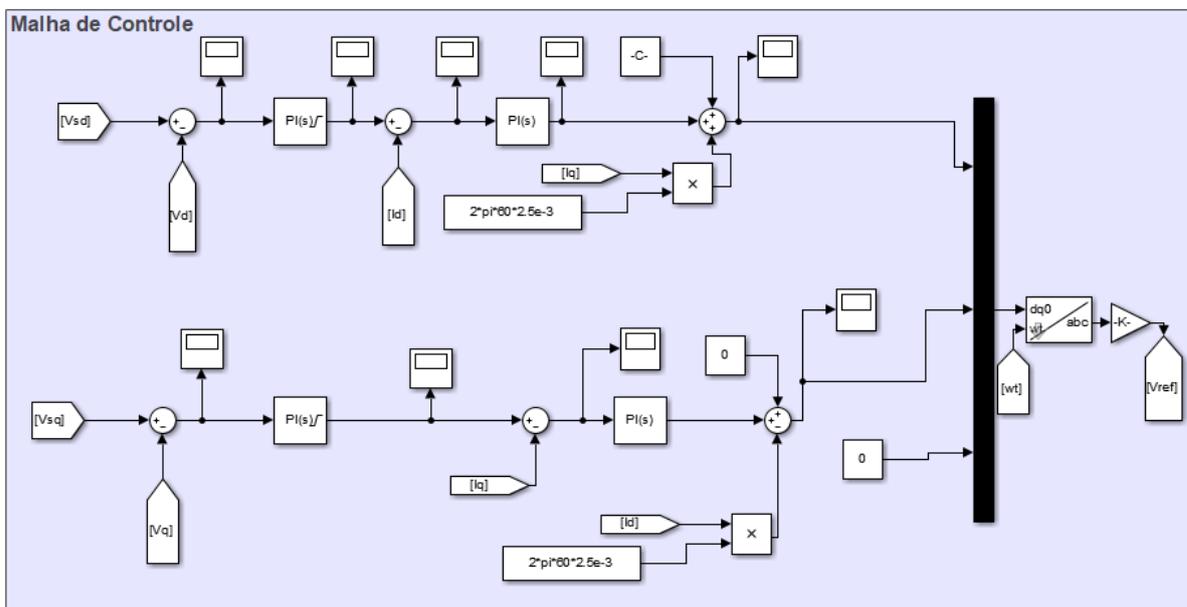
Fonte: do autor.

Figura 4 – Malha para gerar o sinal em referência síncrona



Fonte: do autor.

Figura 5 – Malha de controle



Fonte: do autor.