



Universidade Federal da Paraíba - UFPB
Centro de Energias Alternativas e
Renováveis
Departamento de Engenharia Elétrica - DEE



José Ricardo Honório Fernandes Filho

Estudo de um Conversor CA-CC na Conexão de uma
Micro-rede CC a uma Rede CA

João Pessoa, 2018

JOSÉ RICARDO HONÓRIO FERNANDES FILHO

**Estudo de um Conversor CA–CC na Conexão de uma
Micro-rede CC a uma Rede CA**

Universidade Federal da Paraíba – UFPB
Centro de Energias Alternativas e Renováveis
Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Dr. Nady Rocha

João Pessoa - Paraíba
Junho de 2018

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

H774e Honorio, Jose Ricardo Honorio Fernandes Filho.
Estudo de um Conversor CA-CC na Conexão de uma
Micro-rede CC a uma Rede CA / Jose Ricardo Honorio
Fernandes Filho Honorio. - João Pessoa, 2018.
56 f. : il.

Monografia (Graduação) - UFPB/CEAR.

1. Conversor CA-CC. 2. Conversor CC-CA. 3. Micro-rede
CC. 4. Simulação. I. Título

UFPB/BC

JOSÉ RICARDO HONÓRIO FERNANDES FILHO

**Estudo de um Conversor CA–CC na Conexão de uma
Micro-rede CC a uma Rede CA**

Trabalho Aprovado:

Prof. Dr. Nady Rocha
Universidade Federal da Paraíba
Orientador

Dr. Camila Seibel Gehrke
Universidade Federal da Paraíba
Avaliadora

Dr. Fabiano Salvadori
Universidade Federal da Paraíba
Avaliador

João Pessoa - Paraíba
Junho de 2018

Agradecimentos

Primeiramente agradeço à Deus, por sempre me concedendo toda força e determinação, me abençoando com oportunidades incríveis, e me mostrar que a vontade Dele é maior e melhor que a minha.

Agradeço à minha família, meu pai José Ricardo e minha mãe Monica Dorand, por estarem sempre a postos quando precisei, por serem meu porto seguro e por todo esforço que me permitiu lutar sempre pelos meus sonhos. A minha namorada, Lahis Amaral, pela pessoa maravilhosa que é, por todo suporte, pela compreensão da minha ausência e cansaço em vários momentos e por sempre me incentivar a continuar a jornada.

Ao meu orientador, Nady Rocha, por ter aceitado este desafio, pela ótima orientação, por toda paciência e principalmente pelo incentivo e apoio. Agradeço aos demais professores do departamento de engenharia elétrica por todos os ensinamentos que contribuíram para minha formação.

*“Não pretendemos que as coisas mudem, se sempre fazemos o mesmo.
A crise é a melhor benção que pode ocorrer com as pessoas e países,
porque a crise traz progressos. A criatividade nasce da angústia, como
o dia nasce da noite escura. É na crise que nascem as invenções, os
descobrimientos e as grandes estratégias. Quem supera a crise, supera
a si mesmo sem ficar ‘superado’. Quem atribui à crise seus fracassos
e penúrias, violenta seu próprio talento e respeita mais os problemas
do que as soluções. A verdadeira crise é a crise da incompetência. Sem
crise não há desafios; sem desafios, a vida é uma rotina, uma lenta agonia.
Sem crise não há mérito. É na crise que se aflora o melhor de cada um.
(Albert Einstein)*

Resumo

Este relatório apresenta um estudo da implementação de um conversor CA-CC em uma micro-rede CC, associada a uma fonte fotovoltaica (FF). Tendo como maior motivação, a necessidade atual de buscar um maior rendimento do consumo energético, a eficiência energética é apresentada pelas micro-redes em corrente contínua, pois seu emprego exclui as perdas relacionadas às conversões de corrente contínua (CC) para corrente alternada (CA) feitas com o intuito de se injetar energia na rede elétrica e depois a conversão inversa, CA para CC, a fim de alimentar cargas residenciais. O sistema em estudo trata-se de uma micro-rede conectada a um retificador (CLR - Conversor Lado Rede) e um inversor (CLC - Conversor Lado Carga) trifásico, uma FF e a uma carga. O trabalho apresenta desde da teoria conceitual aos resultados fornecidos por simulação através do *PSIM*. Foi possível verificar o comportamento operacional da rede de forma estável, e confirmando a importância de sua implementação.

Palavras-chave: Micro-rede CC. Conversor CA-CC. Conversor CC-CA. Simulação.

Abstract

This report presents a study of the implementation of an AC-DC converter in a DC micro-grid, associated to a photovoltaic source. Having the greatest motivation, the current need to seek a higher energy consumption, the energy efficiency is presented by the micro-grids in direct current, because its use excludes the losses related to the conversions of direct current (DC) to AC with the intention of injecting energy into the power grid and then converting the inverter from AC to DC in order to feed residential loads. The system under study is a DC micro-grid with rectifier and three-phase converter, connected to a photovoltaic source and a load. The work presents from the conceptual theory to the results provided by simulation through *emph* PSIM. It was possible to verify the operational behavior of the network in a stable way, and confirming the importance of its implementation.

Keywords: DC micro-grid. AC-DC Converter. DC-AC Converter. Simulation.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Diagrama esquemático da micro-rede CC.	19
Figura 2 – Estrutura de um sistema baseado em micro-redes.	22
Figura 3 – Estrutura base em estudo.	26
Figura 4 – Configuração do CLC.	27
Figura 5 – Configuração do CLR.	28
Figura 6 – Sistema de controle do CLR.	29
Figura 7 – Estrutura base em estudo.	33
Figura 8 – Sinal de saída da Fonte.	34
Figura 9 – Resultados de simulação com degrau negativo: a) Correntes $i_a, i_b, i_c, i_a^*, i_b^*, i_c^*$, b) Correntes i_{s1}, i_{s2}, i_{s3}	35
Figura 10 – Correntes da rede elétrica durante variação da fonte.	36
Figura 11 – Resultados de simulação com degrau negativo: a) Tensões v_{s1}, v_{s2}, v_{s3} , b) Tensões V_c, V_{cref}	37
Figura 12 – Sinal das Potências do Sistema.	38
Figura 13 – Sinal de saída da Fonte.	39
Figura 14 – Resultados de simulação com degrau positivo: a) Correntes $i_a, i_b, i_c, i_a^*, i_b^*, i_c^*$, b) Correntes i_{s1}, i_{s2}, i_{s3}	40
Figura 15 – Correntes da rede elétrica durante variação da fonte.	41
Figura 16 – Resultados de simulação com degrau positivo: a) Tensões v_{s1}, v_{s2}, v_{s3} , b) Tensões V_c, V_{cref}	42
Figura 17 – Sinal das Potências do Sistema.	43
Figura 18 – Sinal de saída da Fonte.	44
Figura 19 – Resultados de simulação com degrau positivo: a) Correntes $i_a, i_b, i_c, i_a^*, i_b^*, i_c^*$, b) Correntes i_{s1}, i_{s2}, i_{s3}	45
Figura 20 – Correntes da rede elétrica durante variação da fonte.	46
Figura 21 – Resultados de simulação com degrau positivo: a) Tensões v_{s1}, v_{s2}, v_{s3} , b) Tensões V_c, V_{cref}	47
Figura 22 – Sinal das Potências do Sistema.	48

Lista de tabelas

Tabela 1 – Países que mais produziram energia elétrica utilizando-se de painéis solares.	24
Tabela 2 – Parâmetros do Sistema	33
Tabela 3 – Parâmetros de Simulação Caso 1.	34
Tabela 4 – Parâmetros de Simulação Caso 2.	38
Tabela 5 – Parâmetros de Simulação Caso 3.	43

Lista de abreviaturas e siglas

ANEEL	Agência nacional de energia elétrica
BESS	Battery energy storage system
CA	Corrente alternada
CC	Corrente contínua
CEDC	Capacitores elétricos de dupla camada
CHP	Combined heat and Power
CLC	Conversor lado carga
CLR	Conversor lado rede
DAE	Dispositivos de armazenamento de energia
FACTS	Flexiple AC transmission systems
FER	Fonte de energia renovável
FF	Fonte fotovoltaica
FV	Fotovoltaico
GD	Geração distribuída
MPPT	Maximum Power Point Tracking
MR	Micro-rede
P_{fonte}	Potência ativa da fonte fotovoltaica
P_g	Potência ativa da rede elétrica
PHC	Ponto H em cascata
P_s	Potência ativa da carga
PWM	Pulse width modulation
SAE	Sistema de Armazenamento de energia
UPS	Uninterruptible power supply

Lista de símbolos

$v_{s1,s2,s3}$	Tensões na carga
$v_{s10',s20',s30'}$	Tensões de polo do inversor
$v_{n0'}$	Tensão do ponto central do inversor ao ponto central do barramento
$v_{r1,r2,r3}$	Tensões do conversor CA-CC
$v_{r10,r20,r30}$	Tensões de polo do conversor CA-CC
v_{g0}	Tensão do ponto central do barramento ao ponto estrela da rede
r_g	Resistência do filtro
l_g	Indutância do filtro
K_p	Ganho proporcional
K_i	Ganho integral
E	Tensão de barramento
v_h	Tensão auxiliar
μ	Fator de distribuição de roda livre
$q_{s1,s2,s3}$	Chaves do inversor
$q_{g1,g2,g3}$	Chaves do retificador
$e_{a,b,c}$	Tensões da rede
P_{ca}	Potência em corrente alternada
P_{cc}	Potência em corrente contínua
i_{cc}	Corrente em corrente contínua

Sumário

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Apresentação	14
1.2	Objetivos	15
1.2.1	Objetivo Geral	15
1.2.2	Objetivos Específicos	15
1.3	Revisão Bibliografica	15
1.4	Organização do Trabalho	19
2	MICRO REDE CC	20
2.1	Panorama Mundial da Microgeração e das Micro-redes CC	23
2.2	Panorama Nacional da Microgeração e das Micro-redes CC	25
2.3	Conclusão	25
3	CONFIGURAÇÃO E ESTRATÉGIAS DO SISTEMA	26
3.1	Configuração Estudada	26
3.2	Conversores	26
3.2.1	Conversor Lado Carga	26
3.2.2	Conversor Lado Rede	28
3.3	Fonte Fotovoltaica	30
3.4	Estratégia PWM	31
3.5	Conclusão	32
4	RESULTADOS E ANÁLISES	33
4.1	Caso 1: Menos Corrente Injetada	34
4.2	Caso 2: Mais Corrente Injetada	38
4.3	Caso 3: Aumento da Carga	43
4.4	Conclusão	48
5	CONCLUSÃO	49
	REFERÊNCIAS	50
	APÊNDICE A – CÓDIGO PARA CONTROLE DO CLC	52
	APÊNDICE B – CÓDIGO PARA CONTROLE DO CLR	54

1 Introdução

1.1 Apresentação

Com o aumento constante da demanda de energia elétrica, associado a preocupações ambientais, tendo em vista que a matriz elétrica mundial é baseada em combustíveis fósseis que são finitos e poluem o meio ambiente emitindo dióxido de carbono quando queimados, têm tornado imprescindível o direcionamento dos sistemas elétricos de potência à geração distribuída utilizando fontes de energia renováveis. Isto se deve ao alto custo de grandes plantas centralizadas de geração. Estas possuem baixa eficiência, além de necessitarem, em sua maioria, de combustíveis fósseis ou morosas aprovações ambientais. Apenas 35%, em média, da energia primária chega aos consumidores na forma de energia elétrica e a extensa estrutura radial de transmissão deixa vulnerável áreas consumidoras [1].

Devido aos altos custos econômicos e, principalmente, os impactos ambientais causados na construção de novas usinas, têm feito com que os governos e os pesquisadores recorram a outros tipos de soluções para o decorrente problema de produção de energia, principalmente em regiões com baixo desenvolvimento econômico, social e em locais nos quais a energia produzida, pelas centrais elétricas, não seja suficiente devido ao crescimento da demanda, baixo investimento por parte de órgãos governamentais. Em especial podem-se destacar à energia solar fotovoltaica e à eólica, onde ambas vêm sendo bastante utilizadas por serem importantes fontes renováveis para geração de eletricidade e por não poluírem o meio ambiente. Atualmente, muitos estudos estão sendo realizados visando observar o comportamento tanto de sistemas fotovoltaicos como de eólicos individualmente, com isso um estudo importante a ser realizado é como estes dois sistemas são conectados a uma micro-rede CC.

Neste contexto, diversos pesquisadores vêm trabalhando com o conceito de micro-rede (MR), arquitetura em que o sistema elétrico é segmentado em grupos de geradores e cargas locais capazes de operar autonomamente. Além da mudança na arquitetura do sistema, se discute a possibilidade de inclusão de MRs em corrente contínua (CC) ao sistema atual. Tal inclusão é justificada pela maior eficiência em incorporar fontes de energias distribuídas em aplicações cujas cargas são predominantemente CC, pois se excluem as conversões para CC. Embora apontada como solução, ainda existem diversas lacunas de ordem técnica e de regulamentação para a implantação de MRs CC, que vão desde a padronização da tensão de operação até o controle das fontes distribuídas, passando pelos desafios da proteção de tais sistemas [1].

Em vista disso, a geração distribuída (GD) decorrente do uso de fontes alternativas

vem sendo incentivada pelo governo federal por meio de órgão como ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) com finalidade de promover soluções para os problemas de fornecimento de energia. Este trabalho tem o objetivo estudar a conexão de uma micro-rede CC a rede em corrente alternada (CA), por meio de um conversor CA-CC

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Tem-se como objetivo geral o controle e avaliação do desempenho de uma micro-rede CC, conectada a rede CA por meio de um conversor CA-CC por um barramento comum, através do ambiente computacional PSIM.

1.2.2 Objetivos Específicos

Pode-se destacar como objetivos específicos os seguintes tópicos:

- Estudar o princípio de funcionamento de uma micro-rede CC;
- Implementar uma micro-rede CC em PSIM;
- Implementar um conversor CA-CC para conexão da MR-CC a uma rede CA.

1.3 Revisão Bibliográfica

Para se obter uma maior compreensão sobre o tema deste trabalho, assim como entender as pesquisas que já foram e estão sendo realizadas e a contribuição deste trabalho, uma revisão na literatura é realizada sobre micro-rede CC com o intuito de ter uma visão geral sobre o funcionamento dessa forma de distribuição.

Em [2] descreve-se um novo controle de tensão de distribuição CC para micro-rede CC. Assumindo-se dois bancos de capacitores de dupla camada (CEDC) conectados a uma rede CC através de conversores CC/CC, e cada conversor CEDC controla a tensão de distribuição CC quando o sistema se desconecta da rede elétrica (operação de ilhamento intencional). Em estudo anterior, foi proposto um controle de incremento de ganhos que altera o ganho de realimentação de acordo com a potência de saída para compartilhar as potências de saída. Além disso em [2], é proposto um novo controle de tensão que combina controle fuzzy além do controle de programação de ganho para gerenciar a energia armazenada. Os resultados da simulação demonstraram que o método proposto realizou o controle de regulação de tensão CC e o controle de balanceamento de energia simultaneamente.

Em [3] aborda-se o controle ideal dos dispositivos de armazenamento de energia da micro-rede. A energia armazenada é controlada para equilibrar a geração de energia de fontes renováveis para otimizar o consumo geral de energia no ponto de micro-rede de acoplamento comum. Trabalhos recentes enfatizam restrições impostas pelo próprio dispositivo de armazenamento, como capacidade limitada e perdas internas. No entanto, esses trabalhos pressupõem modelos altamente simplificados, que negligenciam a conectividade física. Uma solução ótima de fluxo de potência que considera todo o sistema: os limites do dispositivo de armazenamento, os limites de tensão, os limites de corrente e os limites de potência. A rede de energia pode ser arbitrariamente complexa, e o solucionador proposto obtém uma solução globalmente ótima.

Em [4] enfatiza-se principalmente o gerenciamento de energia ideal de um micro-rede, controlando as taxas de carga e descarga da bateria individual. Um controlador baseado em inclinação é proposto para o gerenciamento de energia ideal das baterias. Um agregador foi sugerido na MR que distribui a energia entre as várias fontes de energia renovável (FER) e cada FER finalmente distribui a energia entre as baterias individuais com base no fator de participação de queda. Além disso, as taxas de carga e descarga das baterias são controladas para atingir o fluxo de energia desejado entre a MR e a FER. Os resultados da simulação mostram a eficácia do controlador em atender a potência desejada na MR. O sistema proposto é comparado com um sistema existente para comprovar a eficácia do controlador proposto. Além disso, todos os casos críticos foram considerados, como a falha repentina de qualquer unidade geradora. Foi observado que, devido à falha súbita de qualquer unidade geradora, as FER gerenciam a energia da MR alterando a taxa de carga e descarga das baterias.

Em [5] foi proposto um sistema de controle para uma micro-rede CC com o objetivo de estabilizar a tensão de barramento de modo a prevenir danos aos equipamentos conectados à micro-rede provocados por tensões baixas ou tensões elevadas, minimizar o fluxo de potência com a rede principal por meio de um maior aproveitamento dos geradores conectados na micro-rede e garantir o funcionamento de sistemas de armazenamento a baterias de modo a evitar variações de tensão de barramento. Como forma de garantir um maior aproveitamento das fontes de energia renováveis conectadas ao barramento da micro-rede CC, dois modos de operação foram discutidos para essas fontes: o modo onde são usadas técnicas de rastreamento do ponto de máxima potência dos geradores e o modo onde há o monitoramento da tensão de barramento da micro-rede. Como forma de reduzir variações de tensão de barramento, o uso de sistemas de armazenamento de energia com baterias foi discutido, com os modos de operação em: monitoramento de barramento, potência constante e potência nula. Esses modos de operação foram utilizados para o conversor bidirecional CA/CC responsável pela conexão da rede elétrica principal trifásica à micro-rede CC, que pode funcionar como um retificador, fornecendo potência da rede principal trifásica à micro-rede CC ou como um inversor, fornecendo potência da micro-rede

CC para a rede principal. Foram analisadas seis regiões de operação baseadas no nível de tensão do barramento da micro-rede CC. De acordo com cada região os modos de operação das fontes de energia renovável, dos sistemas de armazenamento de energia, do conversor bidirecional CA/CC e de uma fonte de energia reserva foram escolhidos. Resultados experimentais foram realizados em uma micro-rede CC em laboratório comprovando o funcionamento do sistema de controle proposto, com resultados obtidos para uma situação onde a rede principal trifásica é desconectada da micro-rede CC, simulando uma situação de falta na rede principal, e onde a carga CC conectada à micro-rede varia, sendo possível obter uma tensão de barramento CC com pequena variação para todo o tempo de operação, garantindo uma micro-rede CC robusta.

Em [6] um novo sistema de armazenamento de energia em rede para sistemas fotovoltaicos de larga escala é discutido. Com a configuração proposta, a carga e a descarga da bateria são realizadas através de um regulador de tensão CA que é conectado em série à linha. Para este sistema, o inversor baseado em ponto H em cascata (PHC), que é adequado para uma aplicação de alta potência é selecionado. Em caso de falha em uma ponte H de um inversor PHC, é difícil integrar o inversor solar à rede, pois as tensões do inversor e da rede não são compatíveis. A operação tolerante a falhas do inversor baseado em PHC também pode ser obtida através da configuração proposta. A operação básica e controle de um regulador de tensão, aplicação do regulador de tensão em sistemas de armazenamento de energia da rede, operação tolerante a falhas de um inversor PHC através do regulador de tensão. Para validar o desempenho dos controles propostos, simulações em tempo real são realizadas através da interface do circuito de potência simulado com a placa controladora real com a ajuda de um simulador em tempo real.

Em [7], propõe uma estratégia de controle para a operação estável de uma micro-rede durante diferentes modos de operação, proporcionando o controle de tensão CC e boa qualidade de fornecimento de carga CC. O método proposto se adapta a um sistema de armazenamento à bateria para utilizar a mesma arquitetura de controle para o modo ligado a rede, bem como a operação ilhado sem a necessidade de conhecer o modo de funcionamento da micro-rede.

No modo conectado à rede, espera-se que a FER trabalhe em rastreamento de ponto de potência máxima (MPPT - Maximum Power Point Tracking) e forneça a energia máxima disponível para a rede. A rede elétrica deve suportar o equilíbrio de energia e regular a tensão CC. No modo de operação de ilhamento, não há fonte dominante e as fontes de energia locais são responsáveis pela regulação da tensão da MR e variação de carga. Devido à natureza intermitente da FER e à variação na demanda de carga, os sistemas de armazenamento de energia (SAE) são requisitados para a operação consistente dos sistemas renováveis e regulação de tensão CC.

Além disso, de acordo com os modos de operação das micro-redes, durante o processo

de carregamento, o controlador pode ser obrigado a regular a tensão CC, controlando a taxa de carga da bateria. No modo de descarga, o sistema de controle deve limitar a corrente da bateria e evitar o excesso de descarga durante o tempo em que a bateria regula a tensão CC pelo controle da descarga de energia. Como resultado, é necessário um esquema de gerenciamento de energia adequado para reconhecer adequadamente o modo de operação da micro-rede e coordenar as fontes, os armazenamentos e as cargas para obter as necessidades da micro-rede em diferentes modos de operação, considerando as limitações e recursos da bateria. Duas abordagens principais, isto é, estratégias de controle ativas e distribuídas, foram seguidas nas literaturas e os controladores apropriados são implementados. A estrutura é baseada no acoplamento direto de diferentes fontes de energia ao barramento CC comum, e o gerenciamento de energia é feito por uma unidade central de controle de energia por meio da detecção em tempo real da demanda gerada de energia e carga. Esses esquemas de gerenciamento de energia são aceitos por sua melhor estabilidade, precisão e resposta rápida, no entanto, em uma micro-rede CC, fontes e sistemas de armazenamento são dispersos em toda a rede, onde os esquemas ativos de gerenciamento de energia exigem um link de comunicação confiável e rápido, que não é tecnicamente aceito em micro-redes principalmente devido a problemas de confiabilidade.

A fim de avaliar o desempenho do sistema de armazenamento em uma MR de energia renovável baseada em CC, uma MR simples é selecionada como caso do estudo conforme mostrada na Figura 1. A MR contém o sistema fotovoltaico (FV) como FER, juntamente com um SAE. A MR também está conectada à rede principal por meio de um conversor de tensão, chamado de VSC. A função do GS-VSC, conversor do lado da rede, é para regular a tensão do barramento CC durante o modo conectado à rede. Um VSC de dois níveis é usado para vincular redes CC e CA. A abordagem de controle de modo atual é explorada para controle de potência real/reactiva no lado CA. Assim, a amplitude e o ângulo de fase da tensão do terminal VSC são controlados em uma estrutura de referência giratória. O controle de tensão do link CC é obtido através do controle do componente de potência real.

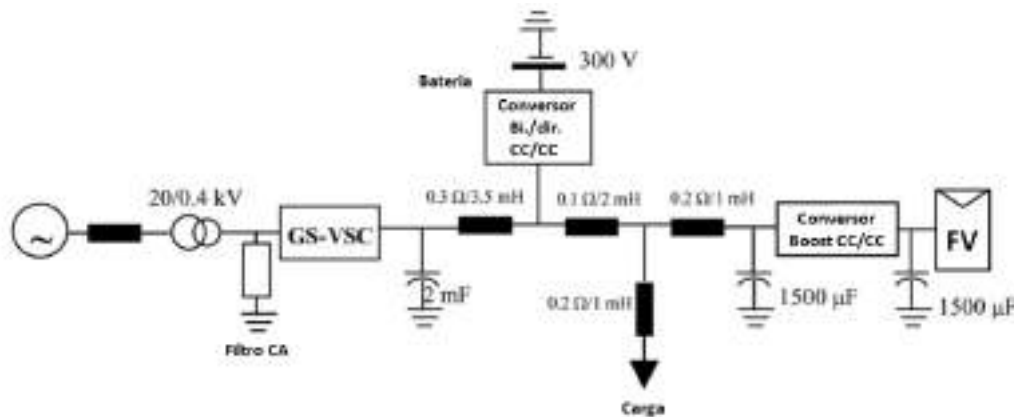
A dinâmica de tensão CC pode ser formulada com base no princípio do equilíbrio da potência,

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} C \times V_{CC}^2 \right) = P_{cc} - P_{ca} \quad (1.1)$$

$$P_{cc} = V_{CC} \times i_{rede}^{CC} \quad (1.2)$$

Um conversor CC/CC também é usado para a conexão de matrizes fotovoltaicas à micro-rede. Cargas CC compostas, incluindo potência constante e termos de impedância constantes, são modeladas para verificar a operação estável do sistema para diferentes modos de operação de micro-rede.

Figura 1 – Diagrama esquemático da micro-rede CC.



Fonte:[7]

O artigo [7] foi utilizado como base, para este documento, utilizado o esquemático mostrado na Figura 1, mas não será abordado a parte do acumulador de energia (conversor CC/CC + Bateria).

1.4 Organização do Trabalho

Este trabalho foi dividido em 5 capítulos. Neste primeiro capítulo foi realizada uma introdução, com a abordagem do tema a ser tratado e a motivação da realização deste trabalho. Foi então feita uma revisão bibliográfica sobre a micro-rede CC, de modo a entender o que está sendo pesquisado atualmente nesta área, exemplos práticos de implementação de micro-redes CC e quais as vantagens e dificuldades desses sistemas, de modo a ter uma base teórica para a elaboração deste trabalho. Os objetivos gerais e específicos que se desejam alcançar foram então apresentados.

No segundo capítulo é apresentada uma introdução mais aprofundada sobre a micro-rede CC, conhecendo sua história e seu desenvolvimento atual, assim como o panorama mundial e nacional em relação ao seu progresso.

No terceiro capítulo será apresentada uma introdução dos conversores estáticos, fontes fotovoltaicas (FF), à apresentação do controlador PI e mostrado o desenvolvimento das estratégias de controle PWM (Modulação por largura de pulso) utilizados no trabalho.

No capítulo quatro, são apresentados os resultados obtidos pelas simulações realizadas e a análise dos mesmos, de forma a comprovar o funcionamento do sistema estudado.

No quinto capítulo será apresentada a conclusão sobre o que foi realizado durante a elaboração deste trabalho, os objetivos que foram alcançados e as contribuições deste trabalho.

2 Micro Rede CC

Neste capítulo será apresentado uma introdução mais aprofundada sobre a micro-rede CC para que se possa ter um maior conhecimento sobre essa forma de distribuição, na qual será apresentado desde sua história, até as dificuldades de implementação.

Devido ao cenário energético atual receber cada vez mais restrições estruturais e ambientais, a microgeração se comporta como uma solução viável para clientes residenciais. As principais fontes de energia utilizadas na microgeração, como a solar utilizando painéis fotovoltaicos e a eólica por meio de aerogeradores, geram energia em corrente contínua. Deste modo, a implementação de micro-redes em corrente contínua faz o uso racional da energia elétrica, pois se excluem as perdas relativas às conversões CC para CA feitas com o intuito de se injetar energia na rede elétrica e depois a conversão inversa, CA para CC, a fim de alimentar dispositivos eletrônicos [8] [9].

Já houve no passado, mais precisamente no fim do século XIX, o questionamento sobre o uso de corrente alternada, apoiada George Westinghouse e Nikola Tesla, ou corrente contínua, defendida por Thomas Edison, para distribuição de energia elétrica. Nessa disputa, a distribuição em corrente contínua foi deixada para trás devido à invenção do transformador. Esse equipamento era capaz de variar os níveis de tensão e, deste modo, facilitava a transmissão de energia, contudo seu uso era restrito aos sistemas em corrente alternada [10].

Na última década, a atenção nas pesquisas relacionadas com a produção de energia elétrica ficou voltada para a busca de soluções energéticas que contribuíssem com o meio ambiente e que fossem alternativas para a limitada produção de energia por grandes centrais elétricas [11][12]. Além da inviabilidade econômica e, principalmente, os impactos ambientais causados na construção de novas usinas têm feito com que os governos e os pesquisadores recorram a outros tipos de soluções para o decorrente problema de produção de energia, principalmente em regiões com baixo desenvolvimento econômico, social e em locais nos quais a energia produzida, pelas centrais elétricas, não seja suficiente devido ao crescimento da demanda, reduzindo investimentos por parte de órgãos governamentais, etc.

Dessa forma, devido ao aquecimento global e mudanças climáticas o interesse público e privado em se obter soluções ecologicamente corretas e com desenvolvimento sustentável têm recebido maior enfoque a nível nacional e mundial [13]. Nesse contexto, diversos pesquisadores que trabalham com a tecnologia de GD estão investigando aplicações de geradores fotovoltaicos, células de combustível ou geração eólica, além do uso de armazenadores de energia, como forma de minimizar os impactos ambientais causados

pelas emissões de carbono [14]. Principalmente em países da Europa, América e Ásia os painéis fotovoltaicos e as células de combustível apresentam grande interesse nas pequenas gerações de energia para atender determinada carga ou injetar a potência excedente na rede.

Uma das características das fontes de energias renováveis para geração distribuída é a grande incerteza associada à geração, como o caso da geração eólica, onde a natureza dos ventos é bastante variável, com mudanças bruscas em direção e intensidade não sendo tão raras, e o caso da geração solar, onde a potência gerada depende de fatores climáticos e do horário. Devido à essa natureza incerta, essas fontes de energia não podem ser conectadas diretamente à rede elétrica, necessitando de um sistema de conversão. Além disso, como forma de amenizar os efeitos da natureza incerta das fontes de geração distribuída, sistemas de armazenamento de energia com baterias (BESS - Battery Energy Storage System) podem ser conectados na micro-rede CC, de forma a carregar baterias durante os períodos onde é gerada mais energia do que a demanda e descarrega-las em períodos onde a demanda é maior do que a energia gerada, sendo possível manter níveis de tensão de barramento sem grandes variações. Para a conexão de fontes renováveis de geração distribuída à micro-rede CC, geralmente são utilizados inversores, para o caso da energia solar, ou conversores CA/CA para o caso da energia eólica.

Para o fornecimento de energia em locais remotos e distantes dos principais centros de distribuição a micro-rede CC também se mostra vantajosa, já que pode haver a possibilidade de implementação de fontes renováveis nesses locais, diminuindo custos com a transmissão de energia elétrica à longas distâncias. Os principais desafios associados à implementação de micro-redes CC são: a falta de uma padronização nos níveis de tensão, que podem variar de maneira significativa dependendo da aplicação, e problemas relacionados à segurança dos usuários, já que os padrões difundidos de segurança atualmente são voltados principalmente para a distribuição em rede CA, além de problemas relacionados à proteção da micro-rede CC [15].

A filosofia da MR é agrupar cargas e fontes formando subsistemas, autossuficientes e que não prejudiquem a integridade da rede, como ilustrado na Figura 2. Isso permite que na ocorrência de algum evento na rede principal, tais subsistemas possam se desacoplar e suprir a demanda local.

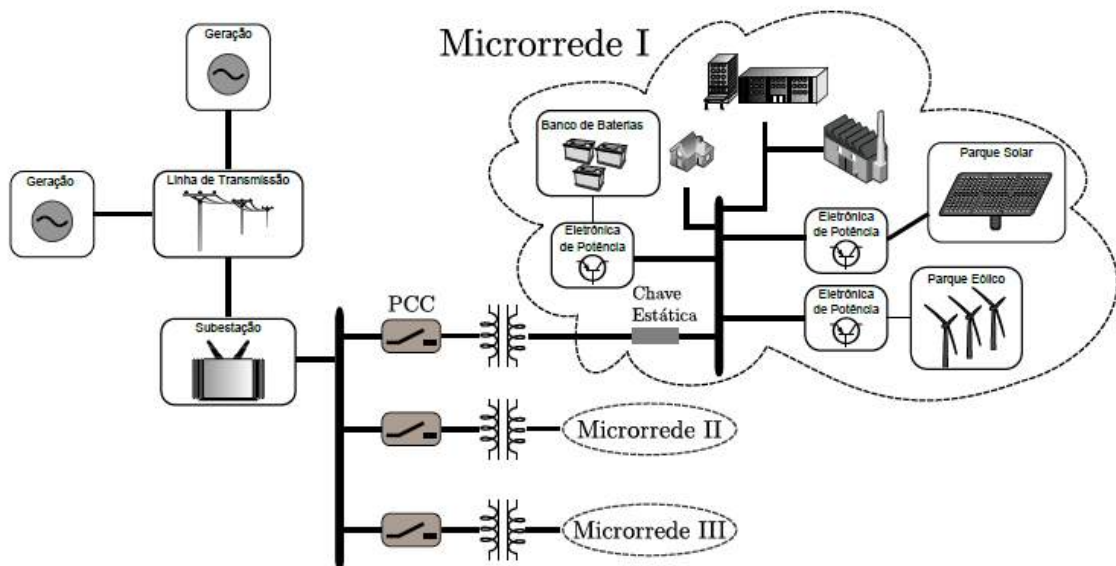
Implementar a filosofia das MRs de maneira confiável e com baixa complexidade de projeto ainda é um desafio. Para contornar tal problema, [16] propõem um modelo *peer-to-peer* e *plug-and-play* para cada componente da MR:

- *peer-to-peer* assegura que nenhum elemento seja crítico para a operação da MR. Isso significa que a MR se mantém ativa mesmo com a perda de qualquer componente, tais como um conversor de potência, um dispositivo de armazenamento ou um gerador.

Nenhum componente é fundamental para manter o sistema operacional.

- *plug-and-play* implica que uma unidade pode ser acoplada em qualquer ponto da MR sem exigir alteração dos controladores.

Figura 2 – Estrutura de um sistema baseado em micro-redes.



Fonte:[1]

Desta forma durante perturbações, essas MRs podem se desconectar do sistema principal e operar autonomamente por meio da geração local suprindo suas cargas correspondentes, como ilustrado na Figura 2. Essa capacidade de desconexão da rede principal (ilhamento) e operação autônoma provê uma confiabilidade superior ao do sistema tradicional. Características como essas que fazem das MRs uma boa solução para expansão e redução de impactos ambientais, visto que as fontes de energia distribuídas geralmente são menos agressivas ao meio ambiente. Exemplos de fontes de energia distribuída são microturbinas, células a combustível, geradores eólicos e FV. Uma vantagem importante dessa arquitetura é a possibilidade de inserção de tecnologias que combinam a produção de calor e energia. Durante a geração de energia, o calor produzido pode ser aproveitado em processos que necessitam de energia e calor, *combined heat and power* (CHP). Essa técnica, também chamada de cogeração, pode atingir 80% de eficiência quando a geração é próxima às cargas que necessitam de energia térmica [17].

Uma MR pode ter a extensão de um município ou uma única casa, no entanto, independente da dimensão, compartilham da mesma filosofia e basicamente dos mesmos elementos:

- geração distribuída;

- cargas;
- conversores estáticos;
- dispositivos de armazenamento de energia (DAE);
- controladores;
- ponto de acoplamento comum.

Geralmente, os sistemas de energia são projetados de tal forma que o pico de carregamento possa ser atendido por fontes já existentes. Entretanto, com o crescimento da demanda, o atendimento a esses picos tem levado os sistemas aos seus limites operacionais, aumentando sua vulnerabilidade quanto à estabilidade dinâmica. O uso das micro-redes não só alivia o carregamento das linhas de transmissão, com a instalação da geração eletricamente próxima às cargas (reduzindo os fluxos e os circuitos de distribuição), como também leva a conseqüente redução de perdas. Sua existência também pode minimizar o impacto das falhas individuais já que, em um evento de desligamento involuntário, as micro-redes podem suprir certas áreas, evitando que o problema atinja uma grande extensão.

2.1 Panorama Mundial da Microgeração e das Micro-redes CC

Até 2014 a europa se destaca-va na utilização da microgeração e na produção de tecnologia que possibilite a implementação desta ideia. Tal destaque devesse a alguns motivos como: elevado número de prestadores de serviço na área, fabricantes de equipamentos específicos, medidores residenciais eletrônicos utilizando o conceito de redes inteligentes e programas de fomento veiculados pelo governo [8].

Além de todos esses fatores, pode-se citar que a matriz energética europeia tem como base os combustíveis fósseis e, deste modo, fazem-se necessários investimentos em alternativas sustentáveis de energia, como é o caso da microgeração.

A partir de 2015 a China e Estados Unidos da América, vêm crescendo muito no setor de geração solar, devido a grandes incentivos do governo e o grande mercado que tem todos os equipamentos para implementação dos projetos solares.

Muitos países já trabalham com rede inteligente de energia, potencializando a eficiência energética, a microgeração e a mobilidade elétrica. Os consumidores recebem um medidor de energia eletrônico, que é capaz de: fazer leituras e operações remotamente, facilitar a detecção e solução de falhas no sistema, possibilitar a comercialização da energia e, além disso, permitir ao cliente utilizar a energia elétrica em um período no qual o preço seja mais favorável.

A criação de um sistema descentralizado gera uma série de impactos na distribuição de energia elétrica, os quais exigem uma reformulação de todo o sistema, principalmente a partir do momento em que a potência alcançada pela geração distribuída atingir 20% da geração total, dificultando o controle, integração e operação deste [8].

Os impactos supracitados estão intimamente ligados ao acesso que os módulos de microgeração residenciais terão à rede de baixa tensão e como os órgãos reguladores estipularão regras para que os antigos consumidores e atuais produtores de energia não poluam a rede de acordo com os critérios de qualidade de energia.

Além disso, outros impasses como o custo da instalação de um projeto de microgeração tem impedido muitos consumidores de implementarem a iniciativa sustentável. A Tabela 1 apresenta os países que possuem a maior capacidade instalada em 2018 segundo [18].

Tabela 1 – Países que mais produziram energia elétrica utilizando-se de painéis solares.

	País	Capacidade Instalada
1	China	131 GW
2	USA	51 GW
3	Japão	49 GW
4	Alemanha	42 GW
5	Italia	19,7 GW
6	Índia	18,3 GW
7	Inglaterra	12,7 GW
8	França	8 GW
9	Austalia	7,2 GW
10	Espanha	5,6 GW

Em consonância com a microgeração surge a possibilidade de se instalar micro-redes CC, pois fontes de energia como a eólica, solar e as células a combustível geram uma grandeza CC. O assunto, mais uma vez, está mais evoluído nos países do hemisfério norte, principalmente nos Estados Unidos e países do continente europeu.

A utilização de micro-redes CC para alimentar *Data Centers* está sendo utilizada como uma solução para o uso eficiente de energia, já que são discriminadas as perdas com as conversões de energia. Além disso, há alguns desafios para implantação das micro-redes CC, tais como a necessidade de mão-de-obra especializada, o dimensionamento de cabos, o qual será diferente daquele utilizado para aplicações em CA, e solucionar o problema dos arcos voltaicos formados nas tomadas CC quando uma carga é desconectada [19].

2.2 Panorama Nacional da Microgeração e das Micro-redes CC

A arquitetura do sistema elétrico brasileiro privilegia as usinas hidrelétricas, mas com o passar dos anos o projeto de grandes hidrelétricas tornou-se uma espécie de inimigo do meio ambiente e da sociedade, fato que tem impedido ou postergado alguns projetos, como caso da usina de Belo Monte no norte do país. Deste modo, buscam-se alternativas para equilibrar na mesma balança: energia, sustentabilidade e inclusão social [8].

É este cenário que a microgeração encontra pela frente no país e já deu importantes passos para viabilização desta no país. A criação da Resolução Normativa no 482 de 2012 e a mais recente no 517 pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) ditam as regras para aqueles que desejam instalar módulos de microgeração em suas residências. Além de estabelecer os procedimentos gerais para a conexão à rede de mini e microgeradores, a resolução propõe a criação de um sistema de compensação de energia, conhecido internacionalmente como *net metering*.

Este assunto ainda gera muitas dúvidas na população e há pouco investimento nacional em tecnologia para implementação deste tipo de projeto, no qual grande parte dos dispositivos utilizados é importada. O ideal seria que se tivesse uma linha especial de crédito para incentivar a aquisição dos equipamentos pelos consumidores, tendo em vista o alto custo destes, fator que ainda limita a quantidade de consumidores que aderem ao projeto.

A pressão da ANEEL, por meio de resoluções, para que as distribuidoras de energia comecem a mudar os medidores eletromecânicos de energia para eletrônicos, no caso de clientes que optem pela tarifa branca, proporcionará um avanço na instalação de módulos de microgeração, pois os medidores eletrônicos permitem a integração desta com a rede elétrica que é, atualmente, a única maneira de se implantar técnicas de microgeração no país.

As micro-redes CC não são contempladas nas resoluções e é um assunto ainda em estudo no Brasil, alvo de trabalhos acadêmicos e especulações. Além disso, o mercado de eletrônicos teria que ser reformulado para que micro-redes CC residenciais se tornassem aptas ao uso.

2.3 Conclusão

Neste capítulo foi apresentado uma visão sobre micro-rede, conhecendo sobre sua história e desenvolvimento durante os anos, assim como os fatos que impulsionaram sua pesquisa nos últimos anos, além de seu atual panorama mundial e nacional, conhecendo seus resultados, e dificuldades de implantação.

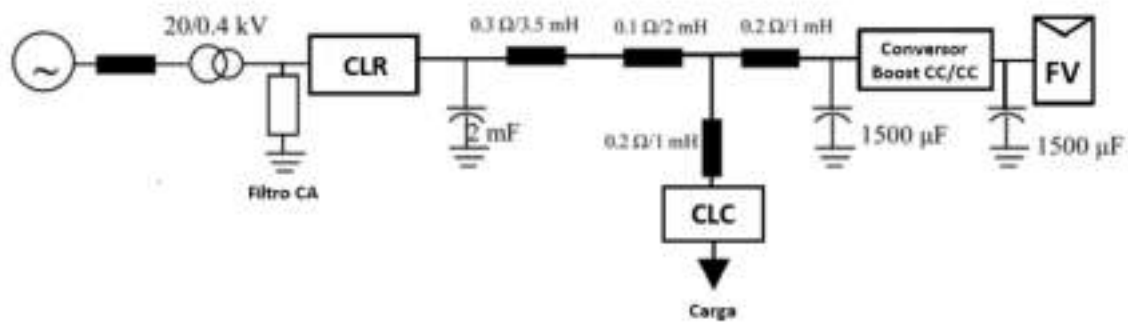
3 Configuração e Estratégias do Sistema

Neste capítulo será apresentada a configuração estudada neste trabalho, assim como apresentado os principais componentes utilizados no sistema, e as estratégias de controle utilizadas para manter o equilíbrio do sistema.

3.1 Configuração Estudada

Será utilizado como configuração base do sistema em estudo, como já apresentado a Figura 3, que nada mais é que a estrutura anteriormente apresentada sem a bateria.

Figura 3 – Estrutura base em estudo.



É utilizado no sistema da Figura 3 um conversor lado rede (CLR), que trata-se de um retificador utilizado para ligar a rede elétrica a MR CC, utiliza-se um conversor lado carga (CLC), que trata-se de um inversor, que fará a conexão entre a carga e a MR CC, por fim à parte da FF que apresenta o módulo dos painéis conectado a MR, através de um conversor boost.

Será simulado passo a passo todos os componentes do sistema acima, para melhor validação dos resultados.

3.2 Conversores

3.2.1 Conversor Lado Carga

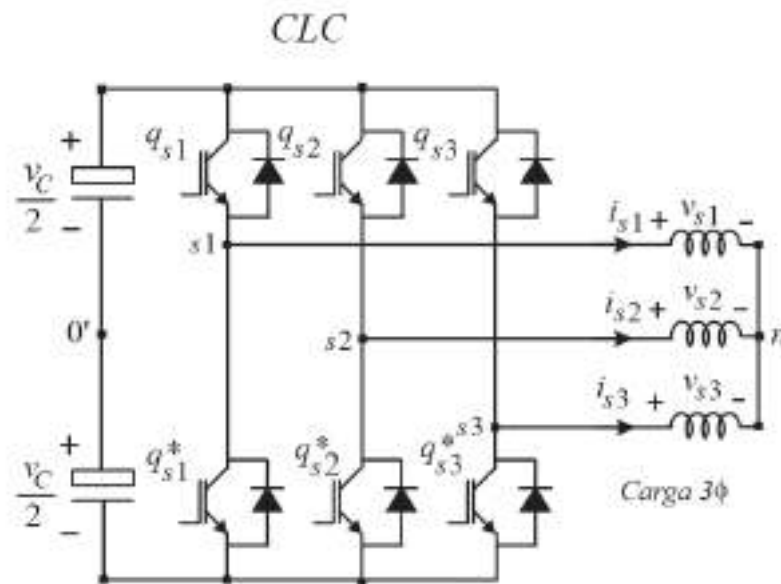
O conversor lado carga (CLC) trata-se de um conversor CC-CA (ou inversor de frequência) trifásico de 6 pulsos, como o mostrado na Figura 4, é um dos principais elementos utilizados em geração distribuída de energia elétrica e também em outras

aplicações como UPS (uninterruptible power supply), equipamentos FACTS (flexible AC transmission systems) e acionamento de máquinas elétricas.

A capacidade de converter tensões e correntes de CC para CA – e vice-versa – e a habilidade de controlar o fluxo bidirecional de energia tornam o inversor CC-CA a estrutura de conversão eletrônica de potência mais adequada para essas aplicações. O inversor possui características de baixa ondulação de tensão no elo de corrente contínua e baixa ondulação de corrente no lado CA [20].

Desta forma, é utilizado um inversor entre a carga e a micro-rede CC, para haver pleno funcionamento da carga. Foi realizado a simulação de um inversor, com a estrutura apresentada na Figura 4, no qual o código de controle, desde a modulação PWM até controle das chaves, é mostrado no Apêndice A.

Figura 4 – Configuração do CLC.



O inversor conectado ao sistema é composto por 6 chaves, que são divididas entre os 3 do bloco superior e 3 do bloco inferior, as quais serão duas ativadas (uma de cada bloco) e conduzirão nos tempos determinados.

O controle da tensão na carga foi realizado em malha aberta. O modelo matemático do inversor pode ser apresentado como:

$$v_{s1} = v_{s10'} - v_{n0'} \tag{3.1}$$

$$v_{s2} = v_{s20'} - v_{n0'} \tag{3.2}$$

$$v_{s3} = v_{s30'} - v_{n0'} \tag{3.3}$$

onde:

- v_{s1}, v_{s2} e v_{s3} são as tensões na carga;
- $v_{s10'}, v_{s20'}$ e $v_{s30'}$ são as tensões de polo do inversor;
- $v_{n0'}$ é a tensão do ponto central do inversor ao ponto central do barramento;

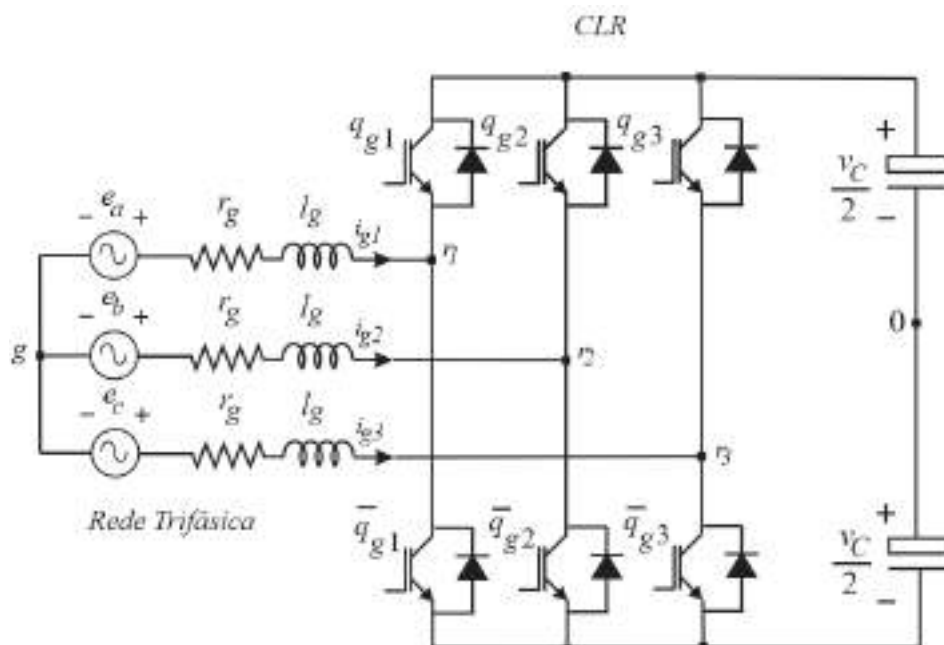
3.2.2 Conversor Lado Rede

O conversor lado rede (CLR) trata-se de um retificador, que é um circuito que faz a ligação de uma fonte CA para uma carga CC, ou seja, converte a tensão alternada de uma fonte em tensão contínua. Retificadores trifásicos controlados são utilizados principalmente em aplicações onde são necessários baixa flutuação de tensão e maior potência CC.

O CLR utilizado neste trabalho será o retificador controlado de seis pulsos, que por sua vez é o tipo de retificador trifásico mais utilizado em aplicações de alta potência por apresentar alta eficiência e baixa ondulação na tensão de saída.

O retificador será utilizado para fazer a ligação entre a rede elétrica CA e a micro-rede CC. Desta forma, foi feito a simulação de um retificador, da seguinte forma apresentada na Figura 5, no qual o código de controle, desde a modulação PWM até controle das chaves, mesma lógica utilizada para o CLC, é mostrado no Apêndice B.

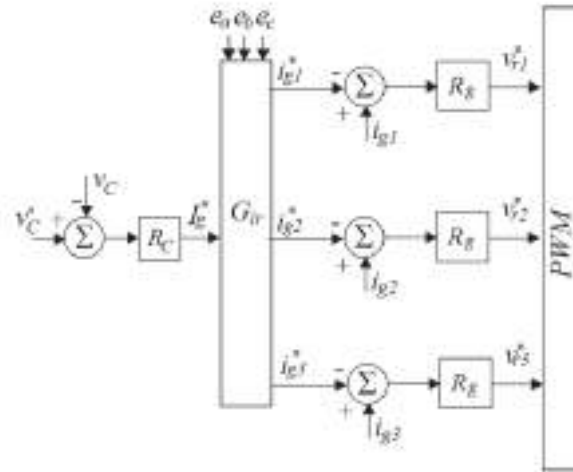
Figura 5 – Configuração do CLR.



A Figura 6 é ilustrado o sistema de controle do conversor CA-CC, que tem como objetivo garantir a tensão da MR estável, garantindo desta forma o fluxo de potência. Irá haver a comparação entre a tensões de referência do barramento e a tensão do barramento existente em cada momento, após esta comparação será utilizado o controlador

PI (representado pelo bloco RC), a amplitude da corrente de referência da rede irá ser utilizada no bloco Gir, que irá gerar as correntes de referência em fase com as tensões, as correntes geradas por sua vez irão ser comparadas com as correntes medidas e o resultado será inserido no controlador ressonante (representado pelo bloco Rg).

Figura 6 – Sistema de controle do CLR.



O modelo matemático do retificador pode ser apresentado como:

$$e_a = r_g i_1 + l_g \frac{di_1}{dt} + v_{r1} \quad (3.4)$$

$$e_b = r_g i_2 + l_g \frac{di_2}{dt} + v_{r2} \quad (3.5)$$

$$e_c = r_g i_3 + l_g \frac{di_3}{dt} + v_{r1} \quad (3.6)$$

$$v_{g0} = \frac{1}{3} (v_{r10} + v_{r20} + v_{r30}) \quad (3.7)$$

sendo:

$$v_{r1} = v_{r10} - v_{g0} \quad (3.8)$$

$$v_{r2} = v_{r20} - v_{g0} \quad (3.9)$$

$$v_{r3} = v_{r30} - v_{g0} \quad (3.10)$$

onde:

- v_{r1}, v_{r2} e v_{r3} são as tensões do conversor CA-CC;
- v_{r10}, v_{r20} e v_{r30} são as tensões de polo do conversor CA-CC;
- v_{g0} é a tensão do ponto central do barramento ao ponto estrela da rede;
- r_g é a resistência do filtro;
- l_g é a indutância do filtro.

3.3 Fonte Fotovoltaica

Os sistemas fotovoltaicos são capazes de gerar energia elétrica através das chamadas células fotovoltaicas. As células fotovoltaicas são feitas de materiais capazes de transformar a radiação solar diretamente em energia elétrica através do chamado “efeito fotovoltaico”. Hoje, o material mais difundido para este uso é o silício.

O efeito fotovoltaico acontece quando a luz solar, através de seus fótons, é absorvida pela célula fotovoltaica. A energia dos fótons da luz é transferida para os elétrons que então ganham a capacidade de movimentar-se. O movimento dos elétrons, por sua vez, gera a corrente elétrica. A eletricidade gerada pelas células está em corrente contínua, que pode ser imediatamente usada ou armazenada em baterias. Atualmente em sistemas conectados à rede, a energia gerada precisa passar por um equipamento chamado inversor, que irá converter a corrente contínua em alternada com as características (frequência, conteúdo de harmônicos, forma da onda, etc) necessárias para atender as condições impostas pela rede elétrica pública. Assim, a energia que não for consumida pode também ser lançada na rede. Tal processo ao utilizar uma micro-rede CC não é necessário, logo não terá perda de energia, além do fato que atualmente muitos aparelhos eletrônicos utilizam-se de corrente contínua, desta forma também não haveria necessidade de converter da CA para CC.

Quanto aos sistemas fotovoltaicos, estes podem ser divididos em dois grandes grupos: sistemas isolados (*off-grid*) e sistemas conectados à rede (*grid-tie*). Os sistemas isolados são aqueles que não se integram a rede elétrica e geralmente são utilizados em locais remotos ou onde o custo de acesso a rede é maior que o custo do próprio sistema. Normalmente estes sistemas utilizam bateria para armazenar a energia. Já os sistemas conectados à rede servem como qualquer outra forma de geração de energia que se utiliza a partir da rede elétrica e são utilizados como substitutos destas outras fontes de energia.

É muito comum a utilização de um Conversor Boost associado a FF, o qual é um circuito eletrônico utilizado para converter uma tensão CC em outra tensão CC de valor maior que a entrada, desta forma tem uma maior influência da fonte no sistema. O sombreamento total ou parcial de um painel do sistema pode causar efeitos indesejáveis como a queda de tensão. Para poder diminuir o efeito de sombreamento nos painéis fotovoltaicos é utilizado conversor Boost controlado em modo de tensão, que altera a largura de pulso do PWM usado para o chaveamento do semicondutor, a fim de evitar quedas de tensão no barramento de saída. A sua não utilização deixaria a o uso da FF um pouco limitado.

Neste trabalho devido ao tempo limitado será utilizado uma fonte de corrente contínua para substituir a FF, para ilustrar a influência da fonte na micro-rede CC.

3.4 Estratégia PWM

A estratégia de Modulação por Largura de Pulso, do inglês *Pulse Width Modulation* (PWM), foi implementada para o chaveamento do CLR e CLC. Essa forma de modulação consiste na alteração do valor de largura de pulso, de modo a gerar um valor médio na tensão de saída igual à referência obtida do sistema de controle, neste trabalho foi utilizada a estratégia PWM do tipo escalar simétrico.

As tensões de polo de referência são definidas pelas Equações (3.11) a (3.13).

$$v_{r1}^* = v_{r10}^* - v_0^* \quad (3.11)$$

$$v_{r2}^* = v_{r20}^* - v_0^* \quad (3.12)$$

$$v_{r3}^* = v_{r30}^* - v_0^* \quad (3.13)$$

Sabendo que o conversor CA-CC fornece as tensões v_{r1}^* , v_{r2}^* e v_{r3}^* simétricas e equilibradas, apenas duas dessas equações são independentes, impedindo a solução deste sistema.

Somando as Equações (3.11) a (3.13), a tensão v_0^* pode ser escrita como:

$$v_0^* = \frac{1}{3}(v_{r10}^* + v_{r20}^* + v_{r30}^*) \quad (3.14)$$

As Equações (3.11), (3.12) e (3.14) formam um sistema linear. Resolvendo esse sistema linear de modo a calcular o valor das referências para as tensões de polo, será obtido:

$$v_{r10}^* = v_{r1}^* - v_h^* \quad (3.15)$$

$$v_{r20}^* = v_{r2}^* - v_h^* \quad (3.16)$$

$$v_{r30}^* = v_{r3}^* - v_h^* \quad (3.17)$$

Para solucionar este problema é necessário utilizar uma tensão auxiliar v_h^* é necessário se encontrar os valores de v_{hmax}^* e v_{hmin}^* como mostrado nas Equações (3.18) e (3.19).

$$v_{hmax}^* = \frac{v_c}{2} - \max \{ v_{r1}^*, v_{r2}^*, v_{r3}^* \} \quad (3.18)$$

$$v_{hmin}^* = -\frac{v_c}{2} - \min \{ v_{r1}^*, v_{r2}^*, v_{r3}^* \} \quad (3.19)$$

Com os valores encontrados através das equações (3.18) e (3.19) e levando em consideração o fator de distribuição de roda livre (μ), com $0 \leq (\mu) \leq 1$, têm-se:

$$v_h^* = \mu v_{hmax}^* + (1 - \mu)v_{hmin}^* \quad (3.20)$$

As referências das tensões de polo são então comparadas com uma portadora triangular de alta frequência, de modo a se obter os sinais de chaveamento para cada braço de chaves. A modulação do CLC é similar, não sendo apresentada neste trabalho.

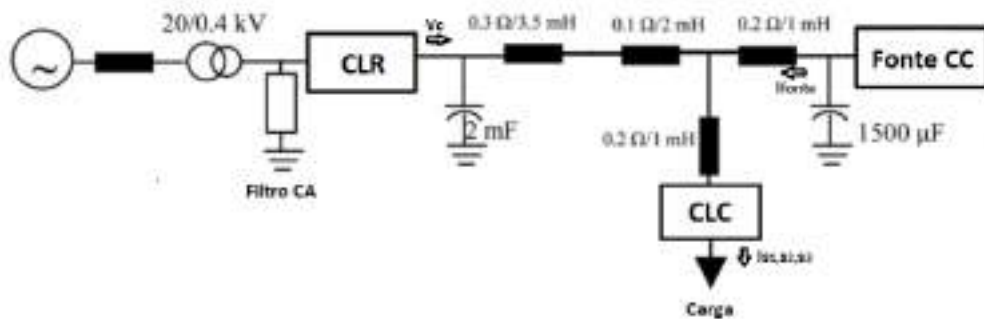
3.5 Conclusão

Neste capítulo foram apresentadas detalhadamente as configurações e estratégias desenvolvidas neste trabalho. O qual foi apresentada as estratégias de controle e PWM do inversor e conversor CA-CC.

4 Resultados e Análises

Com o objetivo de verificar o correto funcionamento do sistema, neste capítulo serão apresentados os resultados de simulação digital realizados através do *software* PSIM para as topologias apresentadas utilizando a estrutura apresentada na Figura 7, na qual é possível verificar como já mencionado a utilização de uma fonte de corrente no lugar da FF.

Figura 7 – Estrutura base em estudo.



Os resultados de simulação obtidos são divididos primeiramente para o caso em que a FF injeta menos corrente no sistema a partir de um certo momento, já o segundo caso a fonte injeta menos corrente no sistema a partir de um certo momento, e o terceiro e último caso o sistema, com a fonte operando de forma constante irá sofrer com o aumento da carga. Com tais casos em estudo, pode-se perceber algumas variações ocorridas na carga e na rede elétrica para conseguir manter a estabilidade do sistema.

A Tabela 2 apresenta as configurações do sistema utilizada em todos os casos em estudo.

Tabela 2 – Parâmetros do Sistema

Parâmetro	Valor
Indutância do retificador (l_g)	5 mH
Resistência do retificador (r_g)	0,1 Ω
Indutância da Carga (l_c)	30,8 mH
Resistência da Carga (r_c)	15,484 Ω
Tensão Barramento CC	400 V
Amplitude da Tensão da Rede Elétrica	220 V
Frequência da Rede Elétrica	60 Hz
Fator de distribuição (μ)	0,5
Corrente inicial da Fonte	5 A

4.1 Caso 1: Menos Corrente Injetada

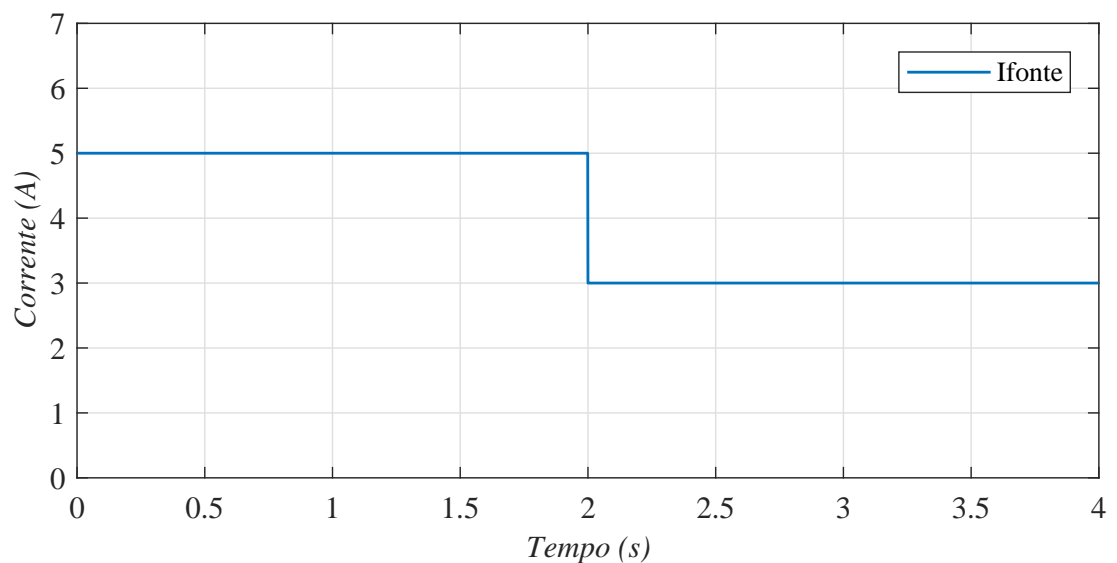
No primeiro caso em estudo, pode-se observar o comportamento do sistema quando à diminuição da energia fornecida pela FF, que irá acarretar em variações a rede. A Tabela 3 apresenta os parâmetros utilizados em simulação para o Caso 1.

Tabela 3 – Parâmetros de Simulação Caso 1.

Parâmetro	Valor
Tempo de Simulação	4 s
Passo de Cálculo	2 μ s
Frequência de Chaveamento	10 kHz
Diminuição da Corrente	-2 A

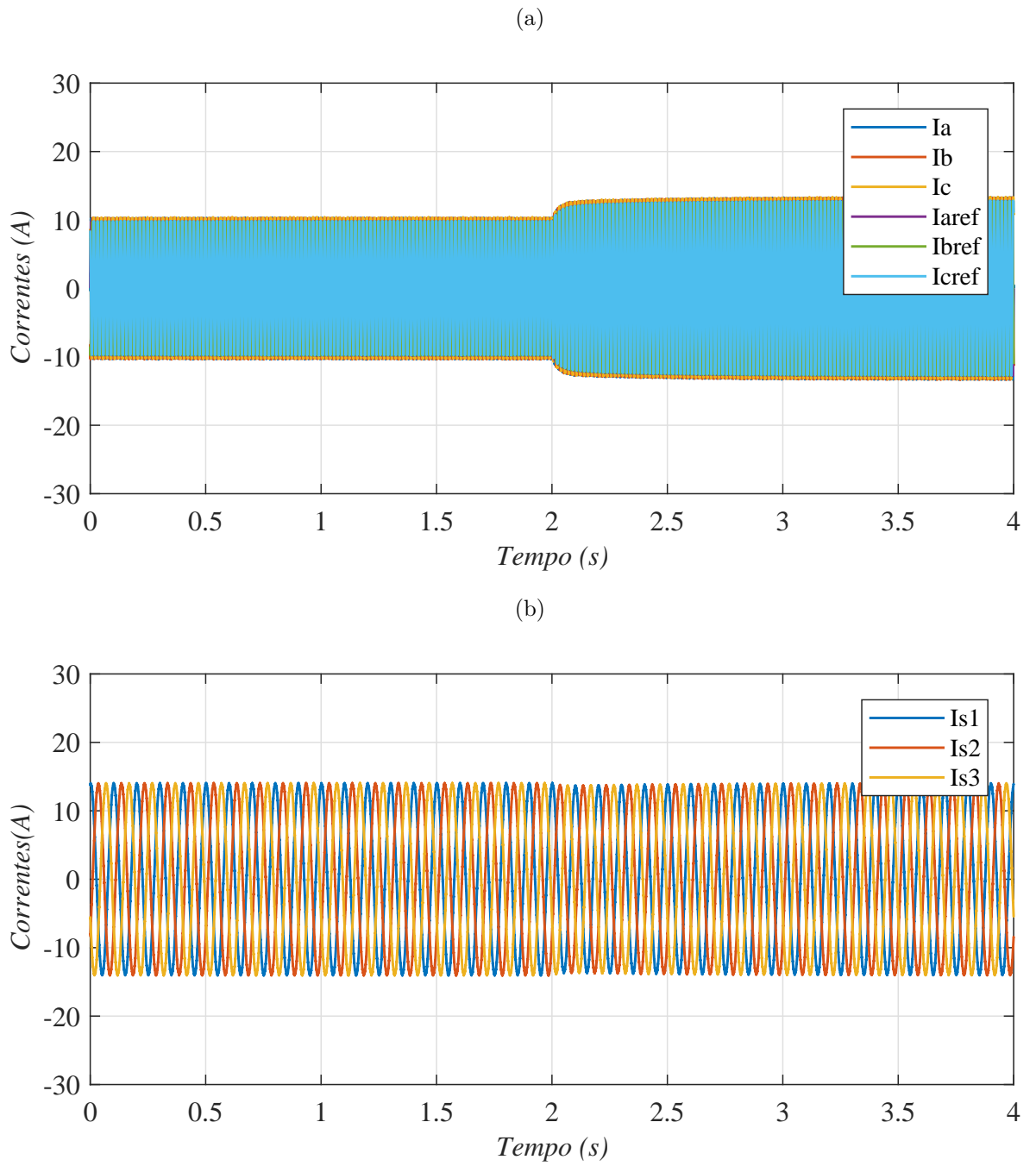
Na Figura 8 pode-se verificar o sinal de saída da FF constatando a diminuição da corrente fornecida para 3 A.

Figura 8 – Sinal de saída da Fonte.



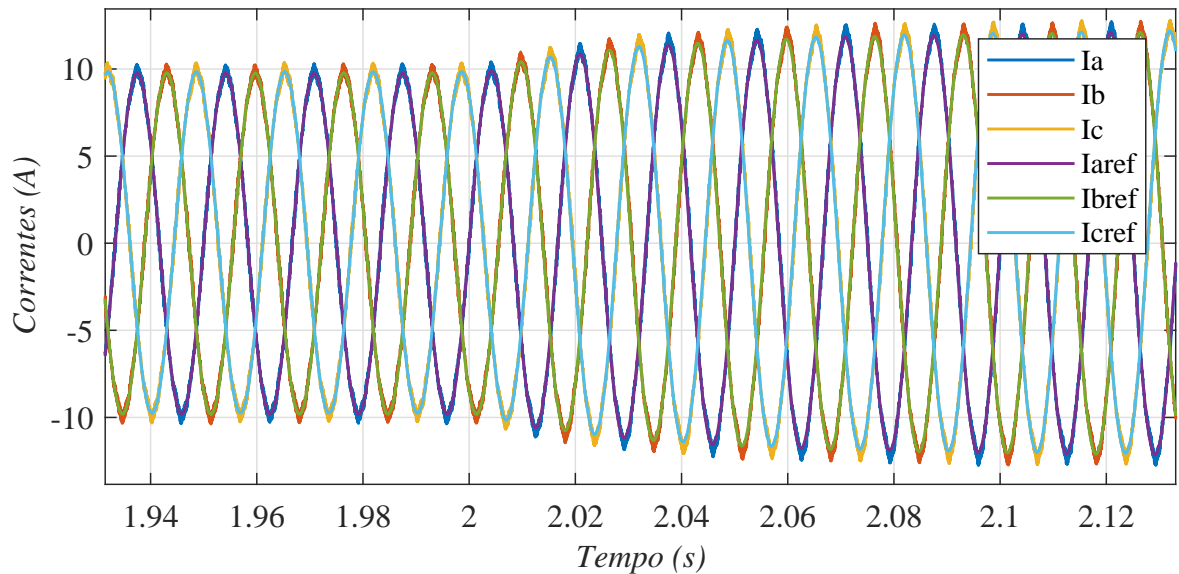
Na Figura 9 são apresentadas as correntes do sistema para o primeiro caso. A Figura 9(a) apresenta as correntes da rede elétrica, na qual é possível verificar que ao diminuir a corrente fornecida pela FF irá haver o aumento do valor da corrente fornecida pela rede, para que seja possível suprir a necessidade da carga. A Figura 9(b) apresenta as correntes da carga, na qual é possível perceber a pequena variação no momento da diminuição da FF, mas sua volta a normalidade de forma rápida.

Figura 9 – Resultados de simulação com degrau negativo: a) Correntes $i_a, i_b, i_c, i_a^*, i_b^*, i_c^*$,
 b) Correntes i_{s1}, i_{s2}, i_{s3}

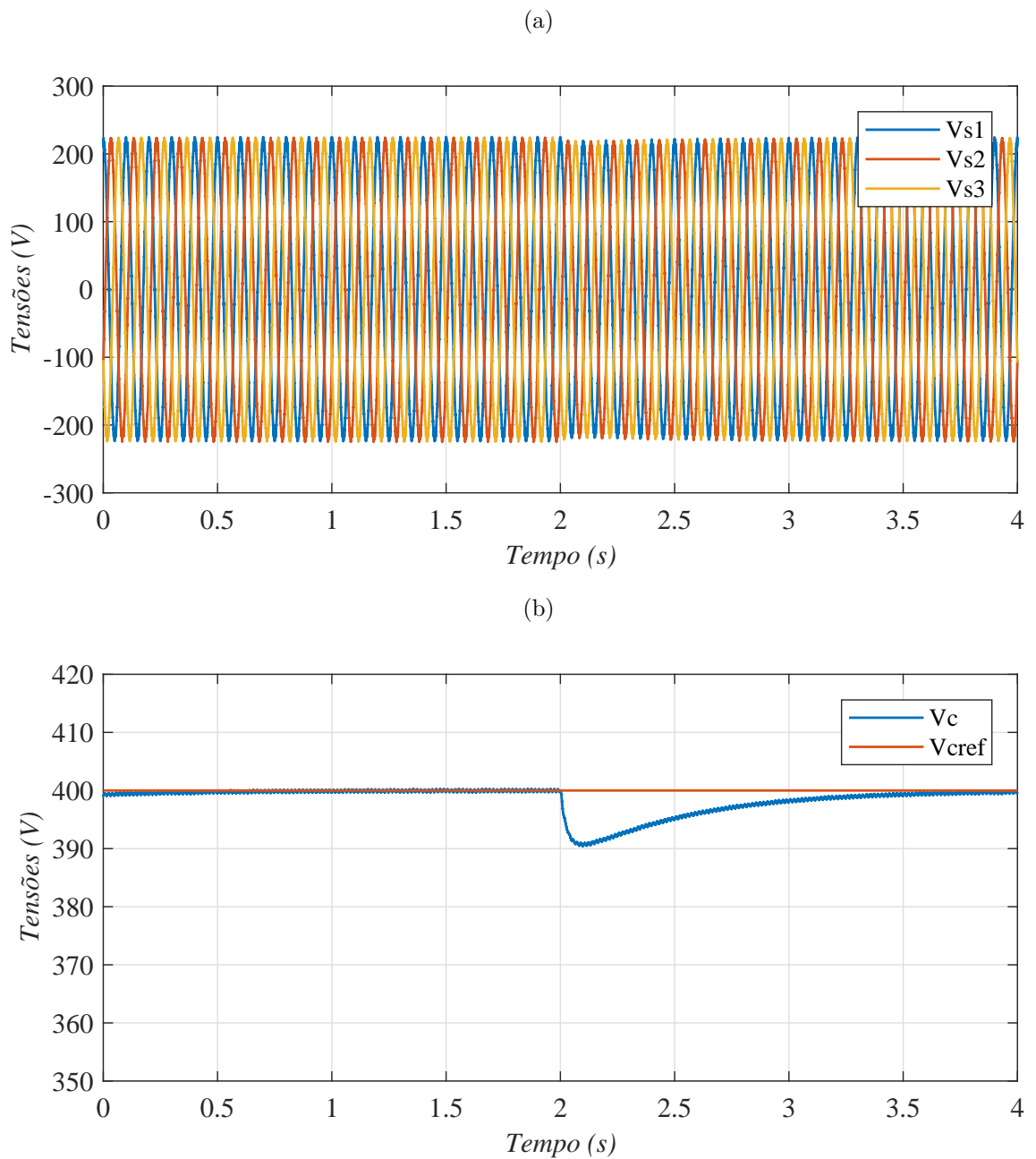


É possível verificar na Figura 10 detalhadamente as correntes da rede elétrica durante o degrau, no qual é confirmado o sinal medido sempre em fase com o sinal de referência.

Figura 10 – Correntes da rede elétrica durante variação da fonte.

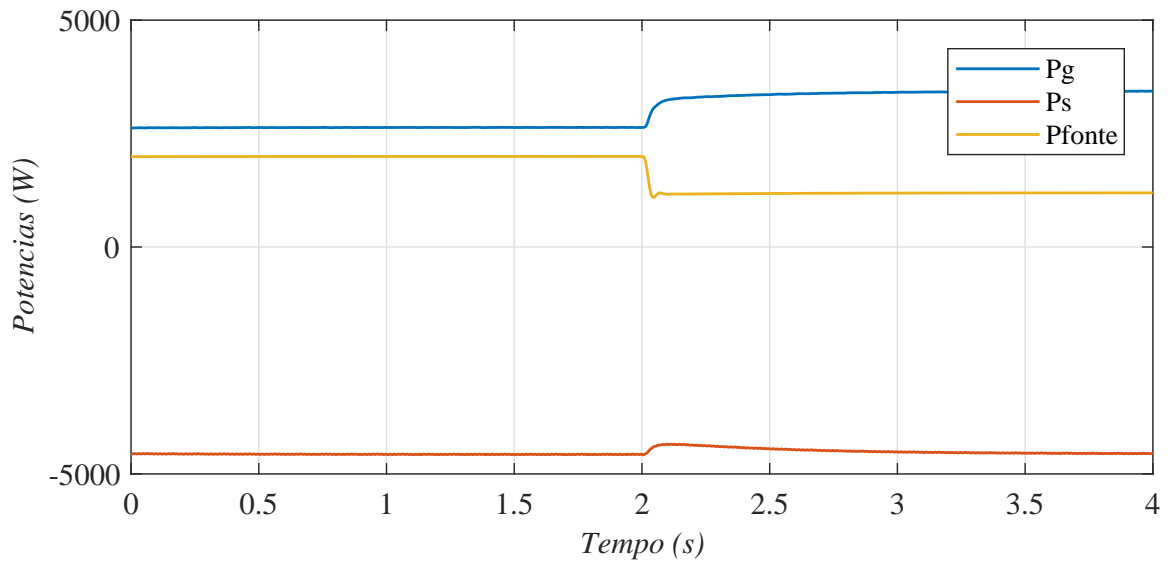


Na Figura 11 são apresentadas as tensões do sistema para o primeiro caso. A Figura 11(a) pode-se perceber a pequena variação ocorrida nas tensões da carga do sistema no momento do degrau, mas sua rápida volta a normalidade. A Figura 11(b) pode-se perceber a grande variação ocorrida na tensão V_{cref} do retificador, onde possui uma queda após o degrau, mas volta ao valor normal de barramento de 400 V.

Figura 11 – Resultados de simulação com degrau negativo: a) Tensões v_{s1} , v_{s2} , v_{s3} , b) Tensões V_c , V_{cref} 

Na Figura 12 são apresentados as potências ativas do sistema para o primeiro caso. Pode-se perceber a variação nas potências da rede elétrica (P_g), da carga (P_s) e da fonte fotovoltaica (P_{fonte}), que devido a diminuição da corrente injetada pela fonte irá ter diminuição de P_{fonte} , mas elevação da P_g , para que consiga compensar a queda de P_s . Logo após acionamento do controle do sistema pode-se perceber a recuperação do equilíbrio.

Figura 12 – Sinal das Potências do Sistema.



4.2 Caso 2: Mais Corrente Injetada

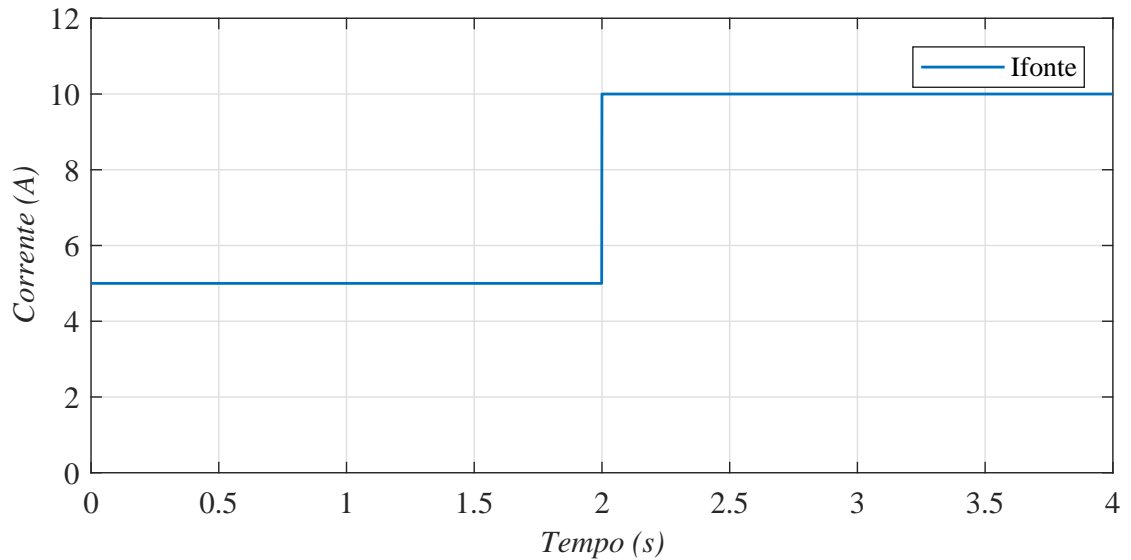
Depois de ser verificado a estabilidade do sistema após a execução do primeiro caso, foi efetuado estudo para o caso no qual é efetuada a injeção de maior corrente no sistema, para se possível verificar a diferença de atuação do sistema. A Tabela 4 apresenta os parâmetros utilizados em simulação para o Caso 2.

Tabela 4 – Parâmetros de Simulação Caso 2.

Parâmetro	Valor
Tempo de Simulação	5 s
Passo de Cálculo	2 μ s
Frequência de Chaveamento	10 kHz
Aumento da Corrente	5 A

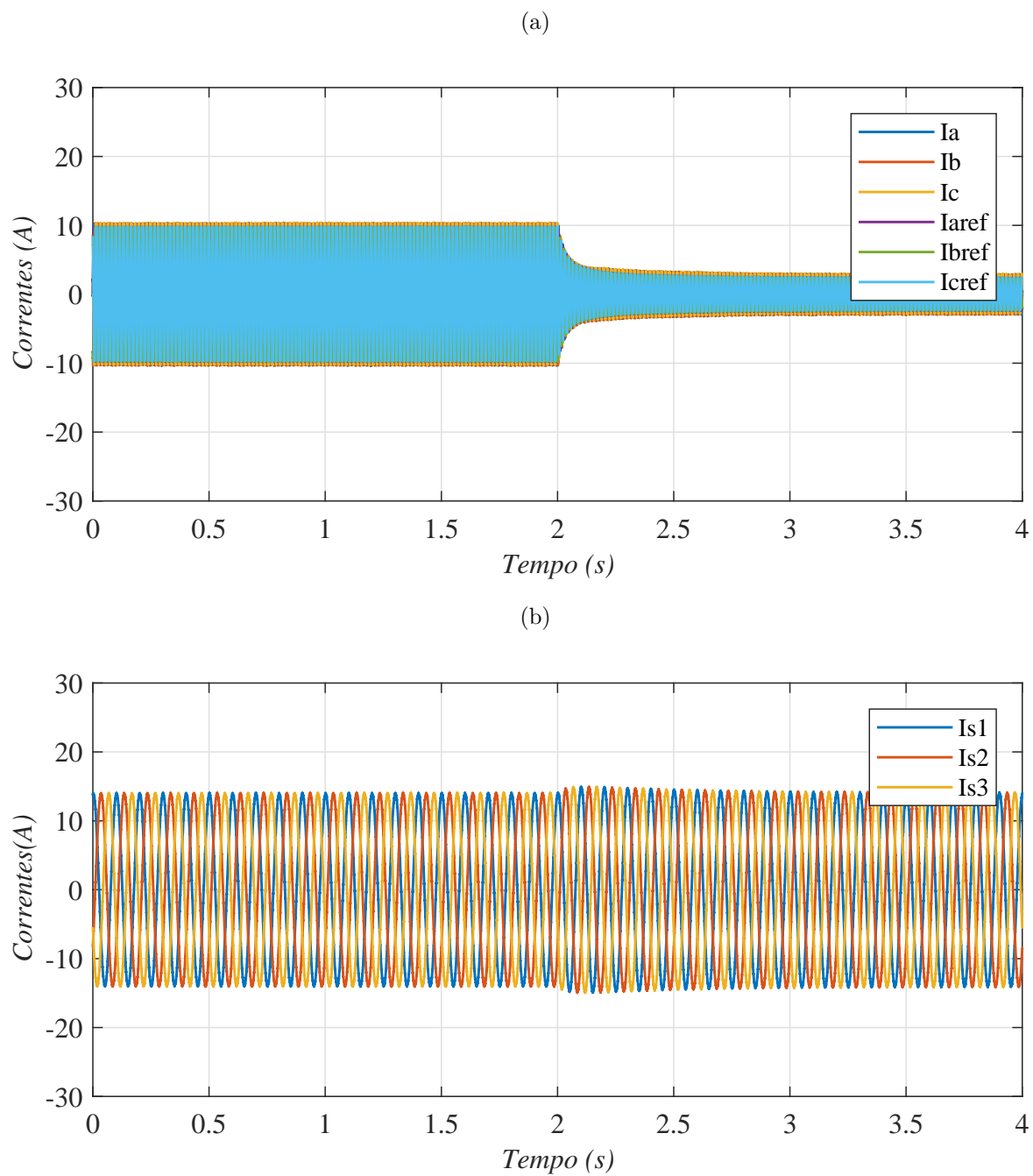
Na Figura 13 é possível verificar o sinal de saída da FF constatando o aumento da corrente fornecida para 10 A.

Figura 13 – Sinal de saída da Fonte.



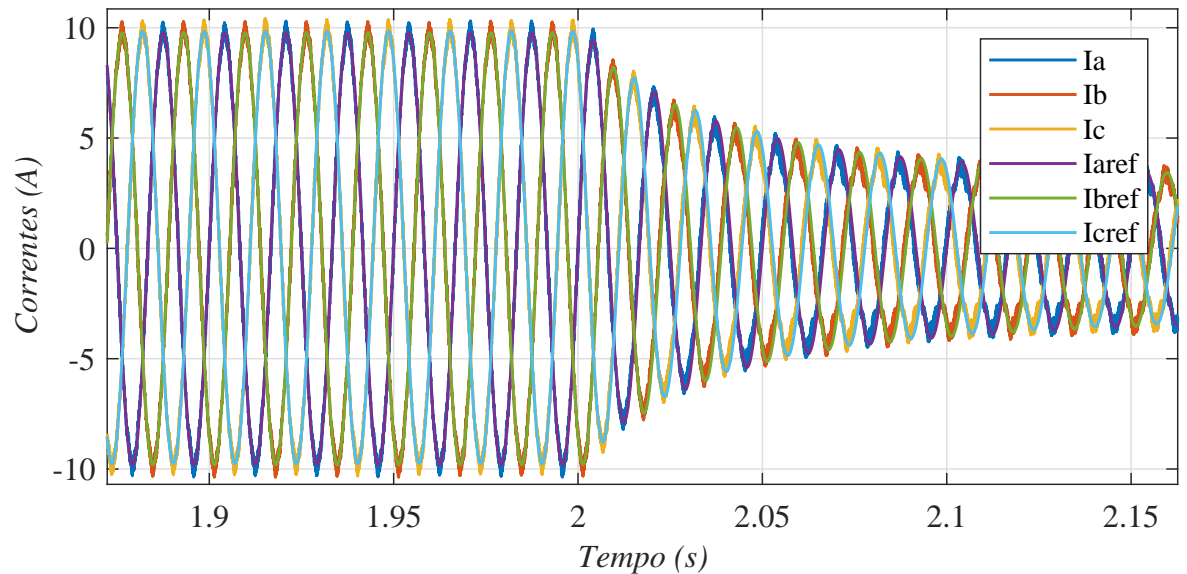
Na Figura 14 são apresentadas as correntes do sistema para o segundo caso. A Figura 14(a) apresenta as correntes da rede elétrica, na qual é possível analisar as variações ocorridas quando há aumento na corrente fornecida pela FF, no qual pode-se verificar que irá haver a diminuição brusca da corrente fornecido pela rede, para que seja possível suprir a necessidade da carga mantendo a estabilidade do sistema. A Figura 14(b) mostra as correntes da carga, na qual é possível perceber a elevação na corrente no momento da variação da corrente fornecida pela fonte, também é possível verificar que logo após um curto tempo a curva do sinal consegue volta a normalidade, demonstrando assim boa atuação do controle.

Figura 14 – Resultados de simulação com degrau positivo: a) Correntes $i_a, i_b, i_c, i_a^*, i_b^*, i_c^*$,
 b) Correntes i_{s1}, i_{s2}, i_{s3}

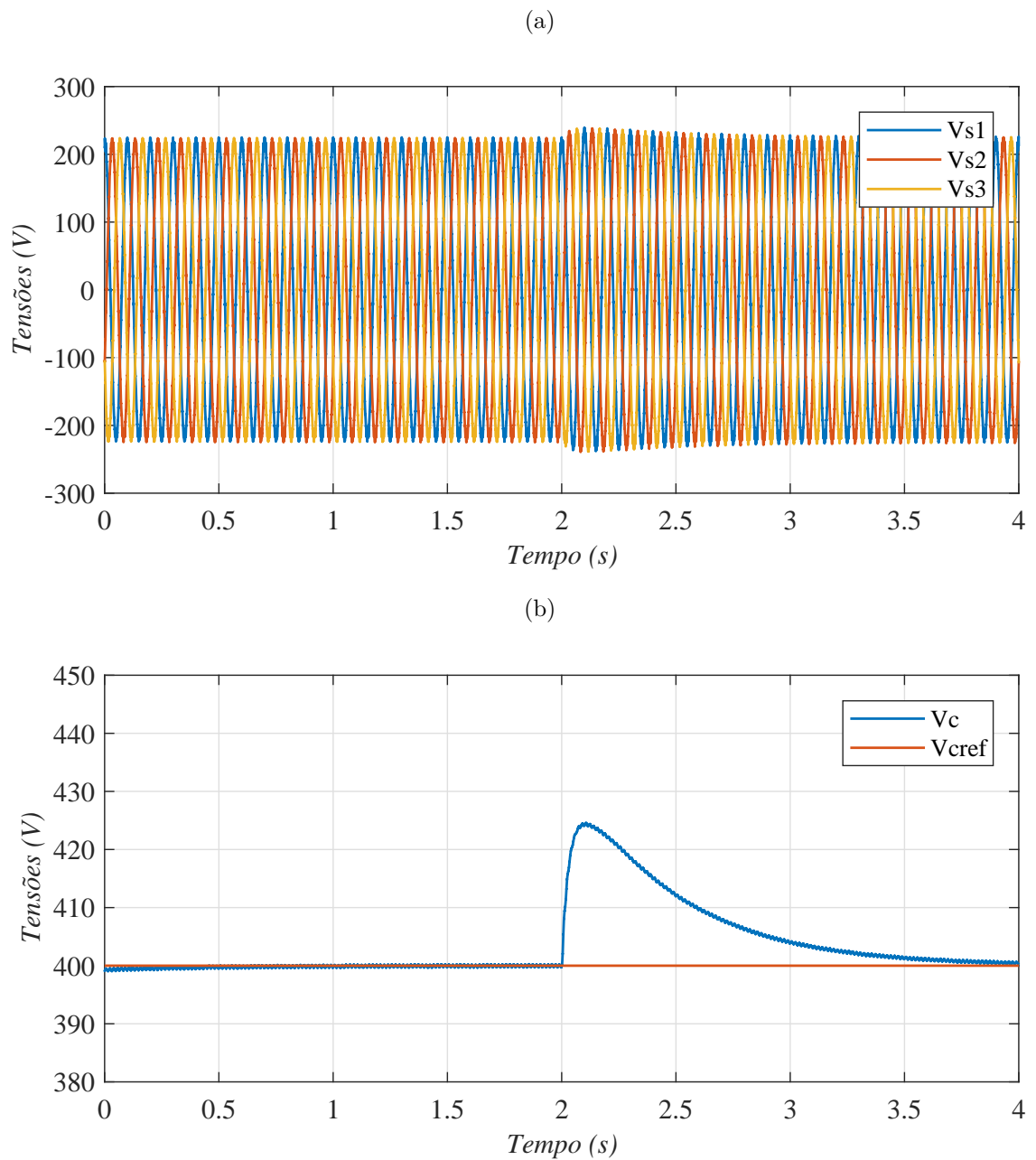


É possível verificar na Figura 15 detalhadamente as correntes da rede elétrica durante o degrau, no qual é confirmado o sinal medido sempre em fase com o sinal de referência.

Figura 15 – Correntes da rede elétrica durante variação da fonte.

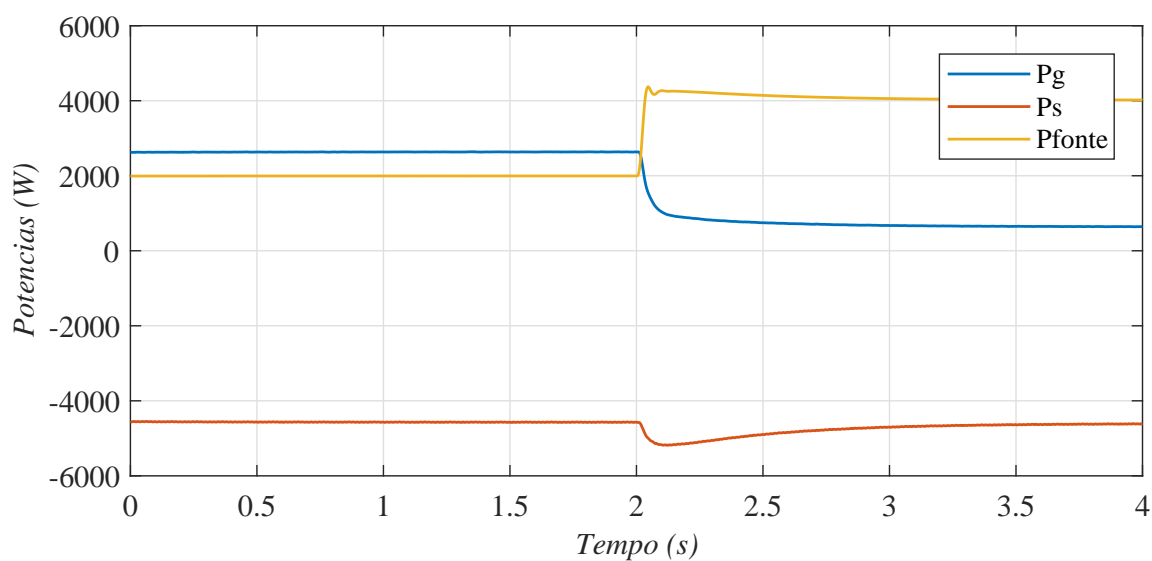


Na Figura 16 são apresentadas as tensões do sistema para o segundo caso. A Figura 16(a) é possível perceber a pequena variação ocorrida nas tensões da carga do sistema no momento da variação, mas sua rápida volta a normalidade para o valor de 220 V estabelecido. A Figura 16(b) pode-se perceber a grande variação ocorrida na tensão V_c do retificador, a qual antes de voltar a sua estabilidade em 400 V sofre um pico devido ao aumento da corrente fornecida pela FF, mas após curto período de tempo volta ao valor normal de barramento.

Figura 16 – Resultados de simulação com degrau positivo: a) Tensões v_{s1} , v_{s2} , v_{s3} , b) Tensões V_c , V_{cref} 

Na Figura 17 são apresentados as potências ativas do sistema para o segundo caso. É possível perceber a variação de P_g , P_s e P_{fonte} , que devido ao aumento da corrente injetada pela fonte irá ter aumento de P_{fonte} , mas diminuição da P_g , para que consiga compensar o aumento de P_s . Logo após acionamento do controle do sistema pode-se perceber a recuperação do equilíbrio.

Figura 17 – Sinal das Potências do Sistema.



4.3 Caso 3: Aumento da Carga

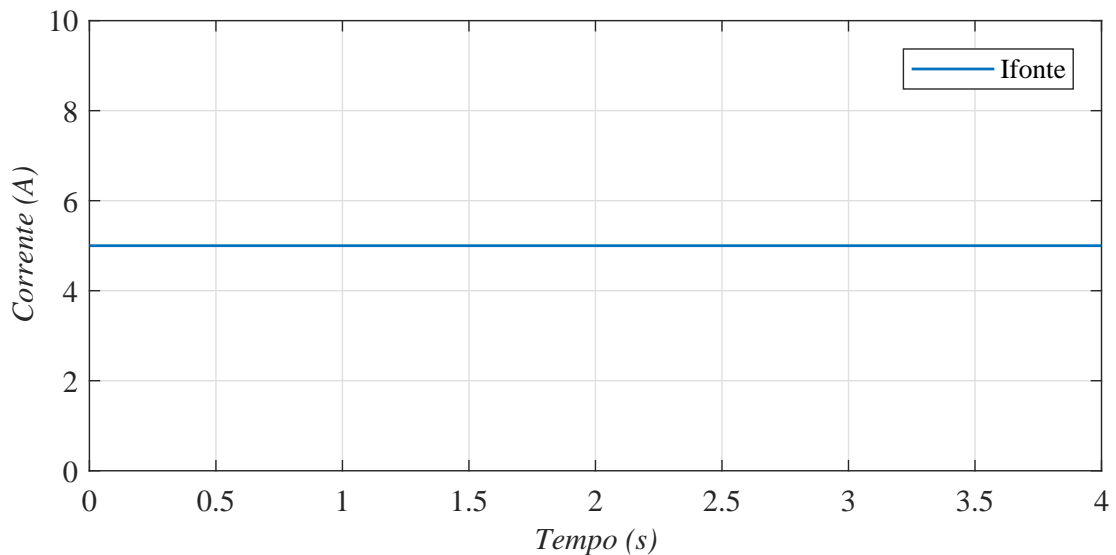
Depois de ser verificado a estabilidade do sistema após variações na energia fornecida pela FF, foi realizado o estudo de caso no qual a variação na carga do sistema, mantendo a corrente fornecida pela FF constante. A Tabela 5 apresenta os parâmetros utilizados em simulação para o Caso 3.

Tabela 5 – Parâmetros de Simulação Caso 3.

Parâmetro	Valor
Tempo de Simulação	5 s
Passo de Cálculo	2 μ s
Frequência de Chaveamento	10 kHz
Corrente da FF	5 A

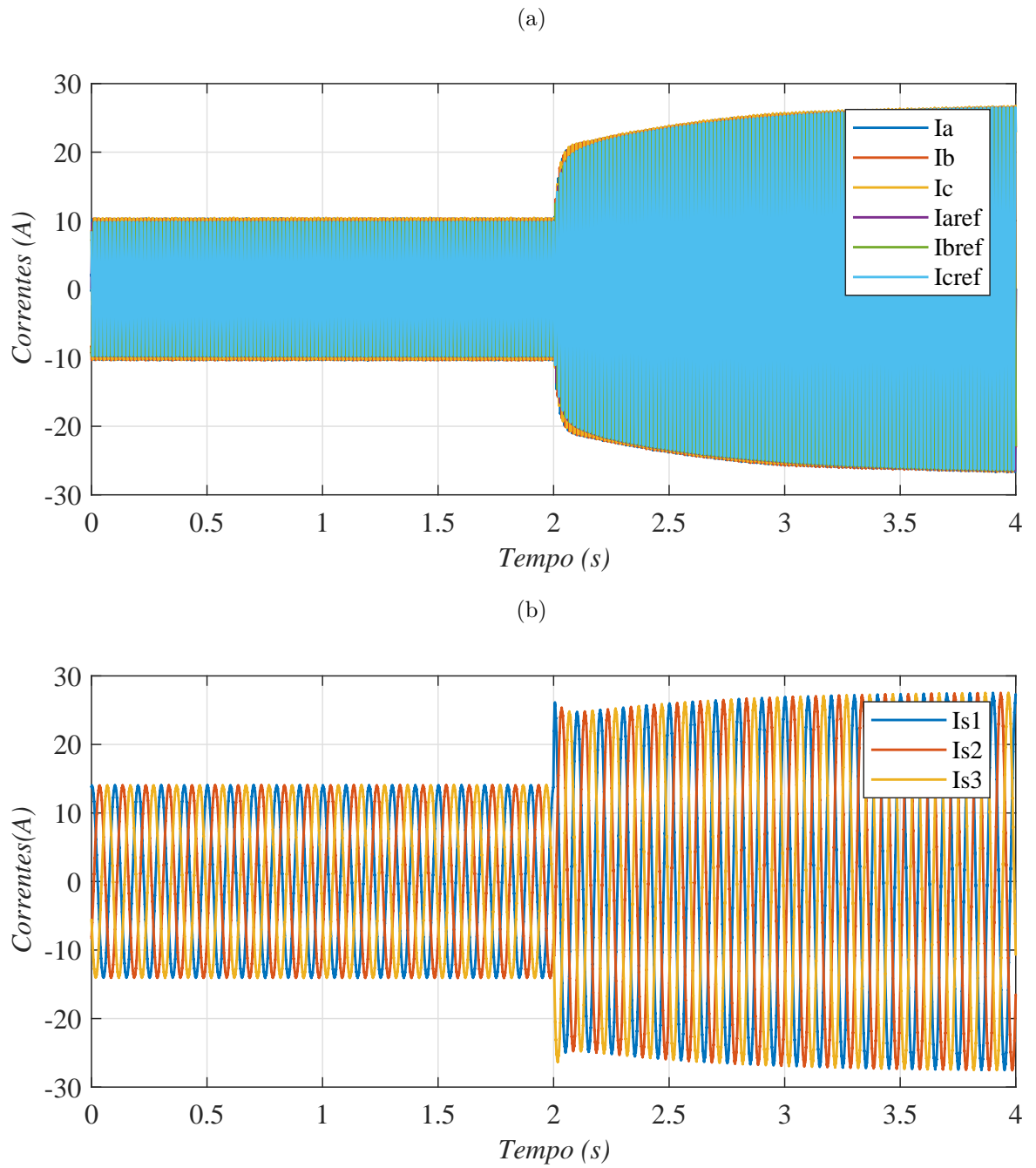
Na Figura 18 é possível verificar o sinal de saída da FF constatando a constância da corrente fornecida em 5 V.

Figura 18 – Sinal de saída da Fonte.



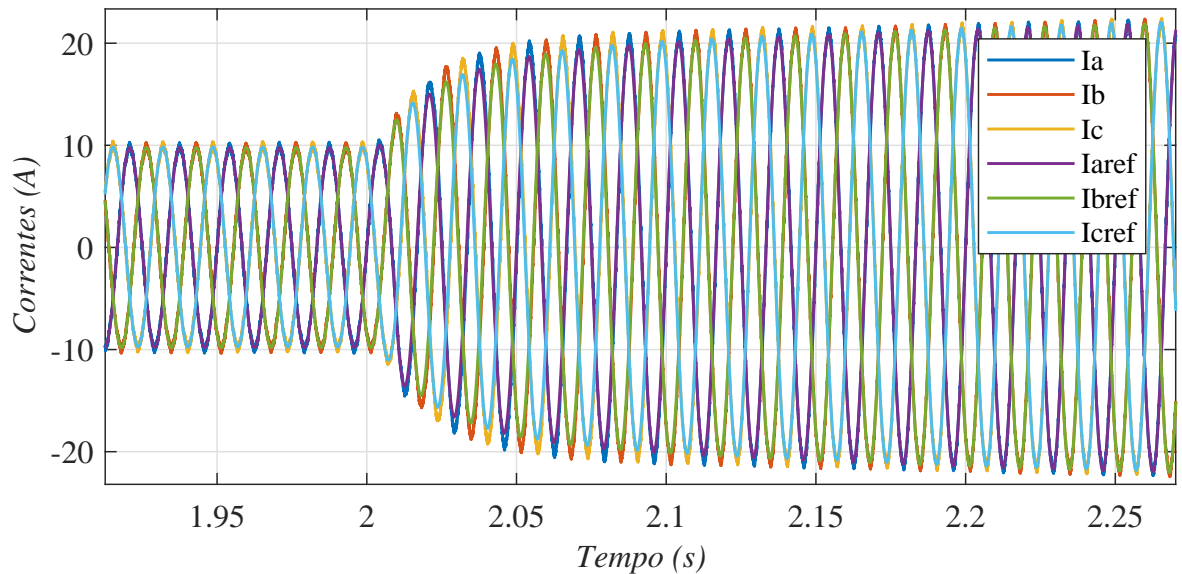
Na Figura 19 são apresentadas as correntes do sistema para o terceiro caso. A Figura 19(a) apresenta as correntes da rede elétrica, na qual é possível analisar as variações ocorridas quando há variação na carga do sistema, com o aumento da carga a corrente fornecida pela rede precisa aumentar exponencialmente para conseguir suprir a nova demanda da carga, é possível verificar a rápida ação do controle e a permanência da estabilidade do sistema. A Figura 19(b) apresenta as correntes da carga, na qual é possível analisar a variação quando a carga é elevada, mas rápida recuperação da estabilidade.

Figura 19 – Resultados de simulação com degrau positivo: a) Correntes $i_a, i_b, i_c, i_a^*, i_b^*, i_c^*$,
 b) Correntes i_{s1}, i_{s2}, i_{s3}

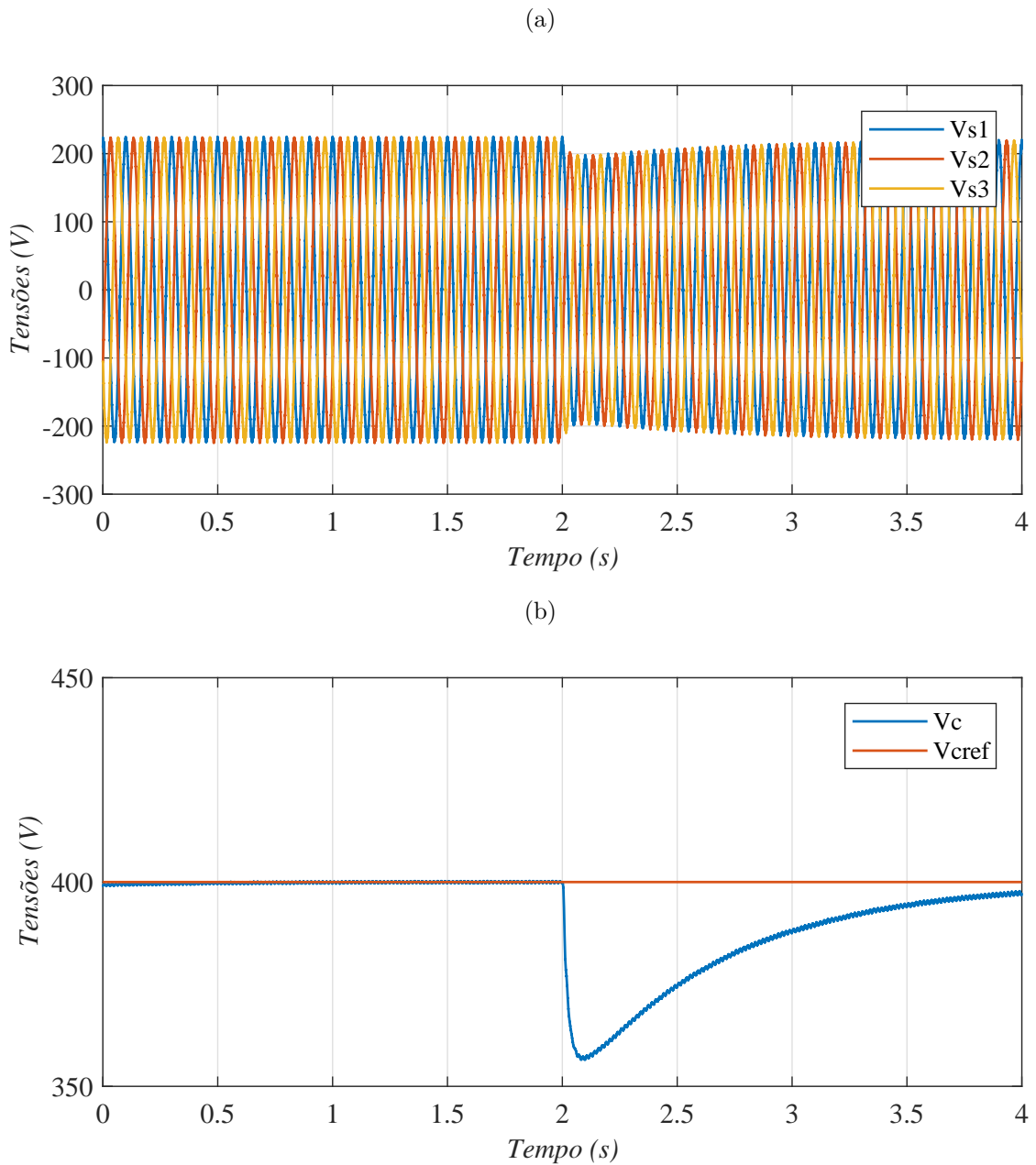


É possível verificar na Figura 20 detalhadamente as correntes da rede elétrica durante o degrau, no qual é confirmado o sinal medido sempre em fase com o sinal de referência.

Figura 20 – Correntes da rede elétrica durante variação da fonte.

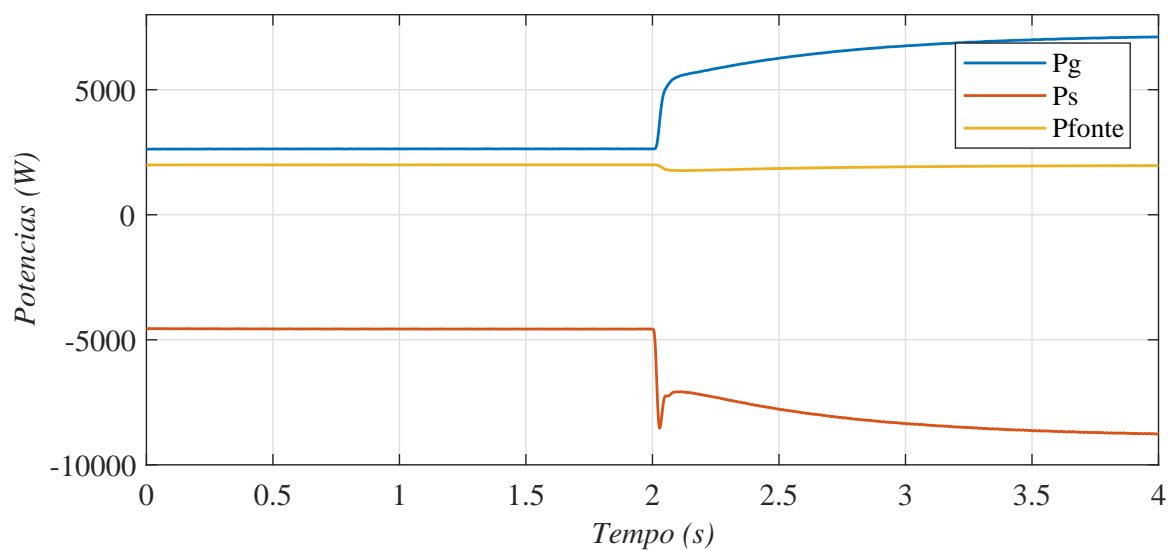


Na Figura 21 são apresentadas as tensões do sistema para o segundo caso. A Figura 21(a) pode-se perceber a pequena variação ocorrida nas tensões da carga do sistema no momento que ocorre a variação da carga, mas sua rápida volta a normalidade para o valor de 220 V estabelecido. A Figura 21(b) pode-se perceber a grande variação ocorrida na tensão V_c do retificador, a qual antes de voltar a sua estabilidade em 400 V sofre um grande decaimento devido a variação da carga, mas após curto período de tempo volta ao valor normal de barramento.

Figura 21 – Resultados de simulação com degrau positivo: a) Tensões v_{s1} , v_{s2} , v_{s3} , b) Tensões V_c , V_{ref} 

Na Figura 22 são apresentados as potências ativas do sistema para o terceiro caso. É possível perceber a variação de P_g , P_s e P_{fonte} , que devido ao aumento da carga irá ter aumento de P_s e P_g , para poder compensar o grande aumento na carga, já P_{fonte} sofre uma pequena diminuição, mas retorna a normalidade rapidamente. Logo após acionamento do controle do sistema pode-se perceber a recuperação do equilíbrio, no fornecimento das potências.

Figura 22 – Sinal das Potências do Sistema.



4.4 Conclusão

Através dos resultados de simulação, apresentados nesta seção em três casos estudados, foi possível verificar um bom funcionamento do sistema de controle projetado, capaz de se adaptar a diferentes ocasiões e manter o sistema em pleno funcionamento com a estabilidade necessária. Pode-se concluir que o sistema se comportou de forma esperada, sendo possível sua implementação.

5 Conclusão

Neste trabalho foi apresentado a implementação de um conversor CA-CC em uma micro-rede CC conectada a uma fonte fotovoltaica, utilizando inversor controlado conectado a carga. Tendo como maior motivação, a necessidade atual de buscar o rendimento mais eficiente do consumo energético.

Através de simulações computacionais foi possível verificar que o sistema consegue se manter em equilíbrio e reagir plenamente a vários cenários possíveis no dia-a-dia, onde se verificou também um bom funcionamento do controle do CLR e CLC. Verificou-se a interação entre a FF e a rede elétrica, sendo possível ver as mudanças ocorridas na rede nos casos estudados. Foi realizado um controle do retificador e do inversor para garantir que as tensões e corrente sigam seus valores de referência e de forma a evitar desbalanceamentos.

Com isso, é mostrado que é possível realizar a utilização de uma micro-rede CC, conectada a uma FF, capaz de manter o equilíbrio em meio a vários cenários diferentes. Desta forma aumentando a eficiência, desde que se exclui a necessidade da conversão CC.

Como pesquisas futuras a serem conduzidas com base neste trabalho podem-se apontar: a implementação de uma verdadeira FF controlada, variando sua energia fornecida, para que se tenha uma visão mais próxima das variações impostas dependendo do sol presente, e implementação de um sistema de baterias controlado, para armazenamento da energia não utilizada em períodos do dia.

Referências

- 1 TAHIM, A. P. N. *Controle de Microrredes de Distribuição de Energia Elétrica em Corrente Contínua*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 22.
- 2 KAKIGANO YUSHI MIURA, A. N. T. I. H. Distribution voltage control for dc microgrid by converters of energy storages considering the stored energy. In: . [S.l.: s.n.]. Citado na página 15.
- 3 YOASH LEVRON, JOSEP M. GUERRERO, YUVAL BECK. "Optimal Power Flow in Microgrids With Energy Storage," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28. 2013. Citado na página 16.
- 4 SINGH MUKESH SINGH, S. C. K. S. Optimal power scheduling of renewable energy systems in microgrids using distributed energy storage system. *The Institution of Engineering and Technology*, 2016. Citado na página 16.
- 5 JIANFANG, X. Multi-level control of grid-tied dc microgrids. In: *IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*. [S.l.: s.n.]. Citado na página 16.
- 6 VAVILAPALLI UMASHANKAR SUBRAMANIAM, S. P. V. K. R. S. Design and real-time simulation of an ac voltage regulator based battery charger for large-scale pv-grid energy storage systems. In: *IEEE Access*. [S.l.: s.n.]. Citado na página 17.
- 7 NAVID EGHTEDARPOUR, EBRAHIM FARJAH. *Distributed charge/discharge control of energy storages in a renewable-energy-based DC micro-grid*. 2013. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 19.
- 8 DIAS, A. D. F. *Implementação de Microrredes Residenciais em Corrente Contínua através da Microgeração*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual Paulista, 2013. Citado 4 vezes nas páginas 20, 23, 24 e 25.
- 9 BASTOS, R. F. *Sistema de Gerenciamento para a Integração em CC de Fontes Alternativas de Energia e Armazenadores Híbridos Conectados a Rede de Distribuição via Conversores Eletrônicos*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, 2016. Citado na página 20.
- 10 CARLOS A. DOS SANTOS. *O empreendedor Edison ou o visionário Tesla?* 2011. Citado na página 20.
- 11 PEREIRA, V. M. *Estudo e Modelagem dinâmica de Gerador de Indução Acionado por Máquina de Combustão Interna com Controle de Tensão e de Frequência por meio de Inversor PWM*. Dissertação (Mestrado) — UNICAMP, 2003. Citado na página 20.
- 12 A. H. M. SANTOS. *Conservação de energia: eficiência energética de equipamentos e instalações*. 2006. Citado na página 20.

- 13 C. T. PAN, M. C. CHENG, C. M. LAI. “A Novel Integrated DC/AC Converter With High Voltage Gain Capability for Distributed Energy Resource Systems,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 27. 2012. Citado na página 20.
- 14 F. WANG, J. L. DUARTE, M. A. M. HENDRIX e P. RIBEIRO. “Modeling and Analysis of Grid Harmonic Distortion Impact of Aggregated DG Inverters,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 26. 2011. Citado na página 21.
- 15 KUMAR D., ZARE F., GHOSH A. “DC microgrid technology: System architectures, AC grid interfaces, grounding schemes, power quality, communication networks, applications, and standardizations aspects. 2017. Citado na página 21.
- 16 LASSETER R., PAIGI P. *Microgrid: a conceptual solution. In: Power Electronics Specialists Conference (PESC), IEEE 35th Annual*. 2004. Citado na página 21.
- 17 SHIPLEY A., HAMPSON A., HEDMAN B., GARLAND P., BAUTISTA P. *Combined Heat and Power - Effective Energy Solutions for a Sustainable Future*. 2008. Citado na página 22.
- 18 PHOTOVOLTAIC POWER SYSTEMS PROGRAMME. “SNAPSHOT OF GLOBAL PHOTOVOLTAIC MARKETS. 2018. Citado na página 24.
- 19 CRONSHAW, GEOFF. *Future developments in International Standards for electrical installations*. 2010. Citado na página 24.
- 20 KROPOSKI, B. “Benefits of Power Electronic Interfaces for Distributed Energy Systems,” *IEEE Transactions on Power Conversion*. 2010. Citado na página 27.

APÊNDICE A – Código para Controle do CLC

```

//Declarar as grandezas como static double

//Parametros do Inversor
static double E = 0., varef = 0., vbref = 0., vcref = 0., v10ref, v20ref, v30ref, q1 = 0, q2
= 0, q3 = 0;
static double theta = 0., mi=0.5, vtri1 = 0, pi = 0., tpwm = 0., Tpwm = 0., vmax=0,
vmin=0, vh=0;

// Input
pi = 3.1415926535897932384626433832795;
Tpwm=delt; // Passo de Amostragem

E =400.; //Tensão de Referência do Barramento CC

//Entrada do Bloco
vtri1 = x1; //Tensão da onda triangula

//Inicio da modulação PWM

//Entre nessa condição a cada Tpwm.
if(t>=tpwm){
tpwm = tpwm + Tpwm;

theta = theta + 2.*pi*10.*Tpwm; //Angulo da tensão
if (theta > 2.*pi) theta = theta - 2.0*pi; //Limitador do ângulo

//Tensões desejadas na Saída do Inversor - Tensões de referência
varef = 220.0*cos(theta);
vbref = 220.0*cos(theta - (2*pi)/3);
vcref = 220.0*cos(theta + (2*pi)/3);

vmax = E/2 -max(varef, vbref, vcref);
vmin = -E/2 -min(varef, vbref, vcref);

vh = mi*vmax + ((1-mi)*vmin);

```

```
//Tensões de polo do inversor normalizada pela tensão de barramento;
v10ref = (varef + vh)/E;
v20ref = (vbref +vh)/E;
v30ref = (vcref +vh)/E;
}

//Determinação dos estados das chaves
if(v10ref>=vtri1)
{
q1 = 1;
}
else
{
q1 =0;
}
if(v20ref>=vtri1)
{
q2 = 1;
}
else
{
q2 =0;
}
if(v30ref>=vtri1)
{ q3 = 1;
} else
{
q3 =0;
}

//saída
y1 = q1;
y2 = q2;
y3 = q3;
```

APÊNDICE B – Código para Controle do CLR

```

//Declarar as grandezas como static double

//Parametros do Inversor
static double Iaref = 0., Ibref = 0., Icref = 0., q1 = 0, q2 = 0, q3 = 0, Ia = 0, Ib = 0, Ic
= 0;
static double theta = 0., teta = 0., vtri1 = 0, pi = 0., tpwm = 0., Tpwm = 0., ws, fc, kp,
ki;
static double F11, F12, F21, F22, H11, H21, vmax, vmin, vh, mi=0.5, E = 400;
static double X1aa=0., X2aa=0., X1a=0., X2a=0., X1bb=0., X2bb=0., X1b=0., X2b=0.,
X1cc=0., X2cc=0., X1c=0., X2c=0.;
static double varef =0.0,vbref =0.0,vcref =0.0, v10ref, v20ref, v30ref;
static double erroA=0., erroB=0., erroC=0., erroA1=0., erroB1=0., erroC1=0.;

// Entrada
pi = 3.1415926535897932384626433832795;
Tpwm= delt; // Passo de Amostragem

fc = 60.; //Frequencia de Corte do controlador
kp =10.; //Ganho Proporcional
ki = 150.; //Ganho Integral

theta = theta + 2.*pi*60.*delt; //Angulo da tensão
if (theta > 2.*pi) theta = theta - 2.0*pi; //Limitador do ângulo

//Constantes do Cotrolador
ws = 2.0*pi*fc;
teta = ws*Tpwm;
F11 = cos(teta);
F12 = sin(teta)/ws;
F21 = -ws*sin(teta);
F22 = F11;
H11 = 2.0*ki*sin(teta)/ws;
H21 = (cos(teta)-1.0)*2.0*ki;

//Entrada do Bloco
vtri1 = x5; //Tensão da onda triangula

```

```

Ia=x1;
Ib=x2;
Ic=x3;

//Referencias
Iaref = x4 * sin(theta);
Ibref = x4 * sin(theta - (2*pi)/3);
Icref = x4 * sin(theta + (2*pi)/3);

//Erro
erroA = -(Iaref - Ia);
erroB = -(Ibref - Ib);
erroC = -(Icref - Ic);

X1aa = X1a; //Variável anterior
X2aa = X2a; //Variável anterior
X1a = F11*X1aa + F12*X2aa + H11*erroA1;
X2a = F21*X1aa + F22*X2aa + H21*erroA1;
varef = X1a + erroA*kp; // Saida
erroA1 = erroA; //Erro anterior

X1bb = X1b; //Variável anterior
X2bb = X2b; //Variável anterior
X1b = F11*X1bb + F12*X2bb + H11*erroB1;
X2b = F21*X1bb + F22*X2bb + H21*erroB1;
vbref = X1b + erroB*kp; // Saida
erroB1 = erroB; //Erro anterior

vcref = -varef - vbref; // Saida

//Inicio da modulação PWM

//Entre nessa condição a cada Tpwm.
if(t>=tpwm){
tpwm = tpwm + Tpwm;

vmax = E/2 -max(varef, vbref, vcref);
vmin = -E/2 -min(varef, vbref, vcref);

vh = mi*vmax + ((1-mi)*vmin);

//Tensões de polo do inversor normalizada pela tensão de barramento;
v10ref = (varef + vh)/E;

```

```
v20ref = (vbref +vh)/E;
v30ref = (vcref +vh)/E;
}

//Determinação dos estados das chaves
if(v10ref>=vtri1)
{
q1 = 1;
}
else
{
q1 =0;
}
if(v20ref>=vtri1)
{
q2 = 1;
}
else
{
q2 =0;
}
if(v30ref>=vtri1)
{
q3 = 1;
}
else
{
q3 =0;
}

//saída
y1 = q1;
y2 = q2;
y3 = q3;
y4 = Iaref;
y5 = Ibref;
y6 = Icref;
```