

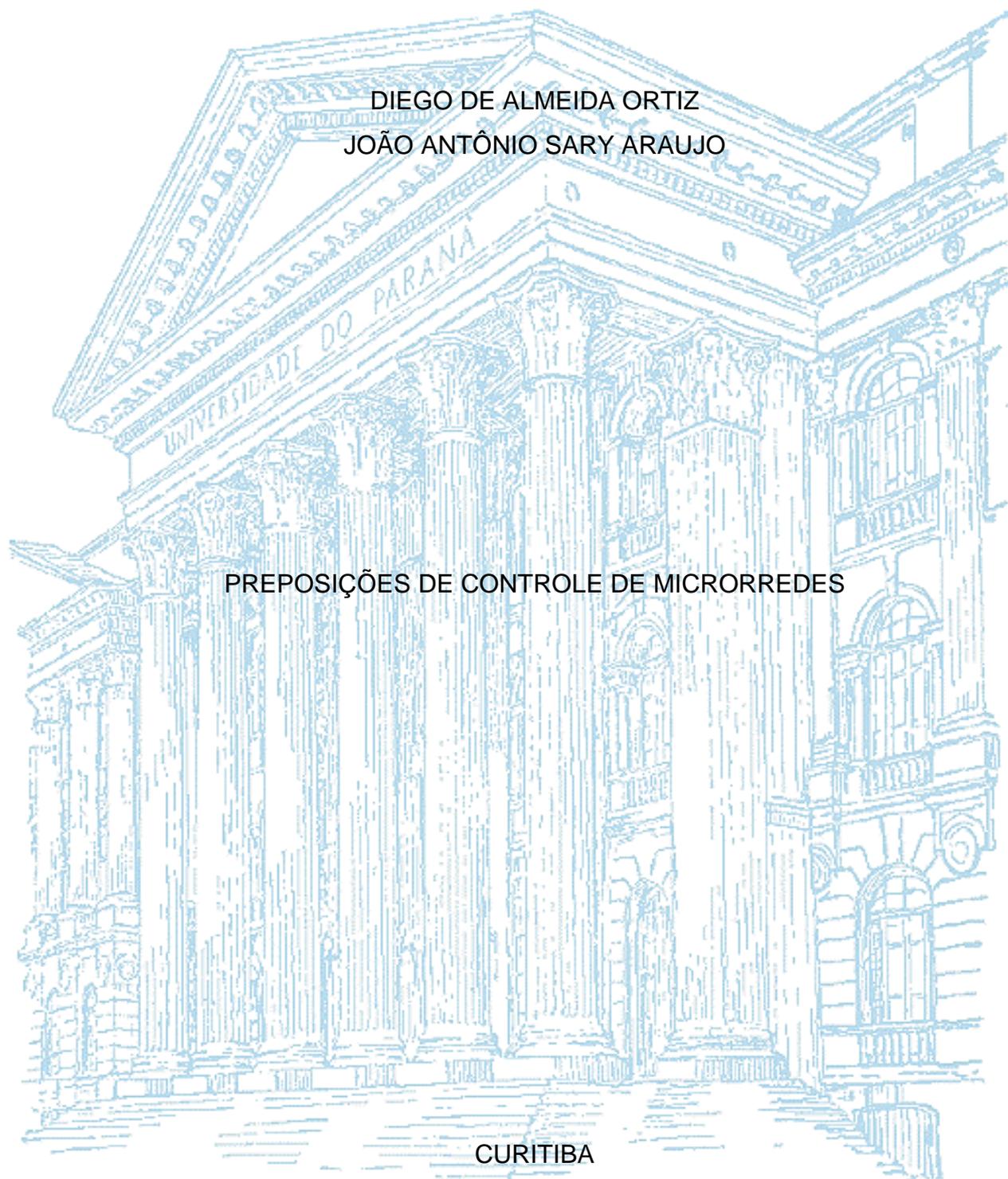
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

DIEGO DE ALMEIDA ORTIZ
JOÃO ANTÔNIO SARY ARAUJO

PREPOSIÇÕES DE CONTROLE DE MICRORREDES

CURITIBA

2019



DIEGO DE ALMEIDA ORTIZ
JOÃO ANTÔNIO SARY ARAUJO

PREPOSIÇÕES DE CONTROLE DE MICRORREDES

Etapa final do trabalho de Conclusão de Curso apresentado à disciplina TE – 105 – Projeto de Graduação, como requisito a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista, ao Departamento de Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. João Américo Vilela Junior

CURITIBA

2019

TERMO DE APROVAÇÃO

DIEGO DE ALMEIDA ORTIZ
JOÃO ANTÔNIO SARY ARAUJO

PREPOSIÇÕES DE CONTROLE DE MICRORREDES

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado como requisito parcial à contenção do título de Engenheiro Eletricista, ao Departamento de Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

Prof. Dr. João Américo Vilela Junior
Orientador – Departamento de Eng. Elétrica – UFPR

Prof. Dr. Rogers Demonti
Departamento de Eng. Elétrica – UFPR

Prof. M. Sc. Cristiano Osinski
Departamento de Eng. Elétrica – UFPR

Curitiba, 22 de Novembro de 2019.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos primeiramente a nossa família, nosso pilar durante toda a vida, nos forneceram o apoio para tornar esse sonho realidade.

Agradecemos ao professor Dr. João Américo Vilela Junior, por nos ter compartilhado o conhecimento, nos guiado e apoiado durante este trabalho.

Agradecemos aos nossos amigos, por nos ajudarem nas dificuldades e por estarem ao nosso lado durante toda a jornada dessa etapa super importante em nossa vida.

E por fim, agradecemos a Universidade Federal do Paraná pela oportunidade de desenvolver-nos profissionalmente e pessoalmente com elevada qualidade.

“Aqueles que são loucos suficiente
para achar que podem mudar o mundo, são
afinal os que têm alguma chance em fazê-lo”

Steve Jobs

RESUMO

Com a crescente utilização da Geração Distribuída, novos métodos de controle, manejo e estruturas da rede de distribuição vem sendo colocados em prática. Assim surgem as Microrredes, sistemas caracterizados pela união de múltiplas fontes de energia, armazenadores e cargas. Se conectam através de um único ponto comum à rede concessionária e são capazes de operar conectadas ou desconectadas a ela. O foco desse estudo está na operação desconectada, onde as fontes e armazenadores precisam suprir a demanda energética das cargas. Essas unidades de geração da Microrrede se utilizam de inversores de tensão, acrescentando o grau de controle e operabilidade dessas fontes. Para que haja sincronia entre eles, é adicionada uma malha de controle denominada Controle Droop, capaz de equalizar a contribuição de injeção de potência para atender a demanda de carga da Microrrede, de forma que nenhuma fonte seja sobrecarregada. Para analisar esse comportamento dos inversores de tensão, foi utilizado o software computacional MATLAB/Simulink para realizar simulações de Microrredes e podermos gerar proposições sobre esse método de controle. Ao conectar dois desses elementos em paralelo alimentando uma carga variável, foi possível observar a sincronia entre eles, com a convergência para a divisão igual da carga variável. Simulando vários cenários de fornecimento e carga, foi possível realizarmos proposições sobre esse método de controle e sua contribuição para a estabilidade dos sistemas de Microrredes ilhadas.

Palavras-chave: Microrrede, geração distribuída, droop, inversor.

ABSTRACT

With the growing use of Distributed Generation, new methods of control, management and structure for the distribution grid is being put into practice. Thus, the Microgrid appear, as systems characterized by the union multiple sources of energy, storage and loads. They're united by a single point of common connection to the main grid and can operate connected or disconnected to it. The focus of this study is in the disconnected operation, where the sources and storages must supply the energetic demand of the loads. The Microgrid's generation units make use of voltage inverters, adding control and operability levels to them. In order to insert synchronism between them, a control system is added, capable to equalize the contribution of power injection to attend the demand by the loads of the Microgrid, in a way that none of the sources get overcharged. To analyse this behavior of the voltage inverters, we used the MATLAB/Simulink software, to perform simulations of the Microgrids and make prepositions of this control method. When two of these sources are connected in parallel feeding a variable load, it was possible to observe the synchronism between them, with the convergency to equal load sharing of the variable load. Simulating multiple scenarios of feeding and load, it was possible to make prepositions of this method of control and its contribution to the stability of isolated Microgrid systems.

Key-words: Microgrid, distributed generation, droop, inverter.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Projeção de conexões de geradores distribuídos à rede.....	15
Figura 2 – Conceito e utilização de Microrredes.	16
Figura 3 - Representação simplificada de uma Microrrede.	20
Figura 4 – Estratégias de controle de parâmetros de tensão de Microrredes.....	22
Figura 5 - Curva de controle Droop.....	24
Figura 6 – Curva característica do Controle Droop, aplicada à geradores síncronos.	26
Figura 7 – Associação de geradores com controle droop em um mesmo sistema	27
Figura 8 - Conceito do inversor de tensão de dois estágios.....	28
Figura 9 – Conversor monofásico (a) Ponte H (b).....	30
Figura 10 – Modulação por Largura de Pulso de dois níveis.....	30
Figura 11 – Blocos funcionais	31
Figura 12 – Representação Fasorial de um sistema trifásico equilibrado.....	31
Figura 13 – Decomposição de um sistema trifásico em um sistema de referência α e β	32
Figura 14 – Princípio de operação da transformada de Park.	34
Figura 15 – Malhas de controle aplicada a um conversor de potência..	36
Figura 16 – Blocos de controle de um inversor alimentador.....	37
Figura 17 – Blocos de controle de um inversor alimentador.....	38
Figura 18 – Topologia de controle do inversor alimentador de rede com controle P Q.....	39
Figura 19 – Topologia de controle do inversor formador de rede..	40
Figura 21 – Estrutura de controle de inversores formadores, sendo a única fonte de tensão do sistema.	41
Figura 22 – Topologia de controle do inversor suporte de rede como fonte de tensão.....	42
Figura 23 – Topologia de controle do inversor suporte de rede como fonte de corrente.	43
Figura 24 – Topologia de controle Droop aplicado a conversores suporte em modo de fonte de tensão.	43
Figura 25 – Controle Droop aplicado aos CSIs.	45

Figura 26 – Comportamento do Controle Droop aplicado à inversores de potência. Divisão de Cargas(a) e sincronia(b) evidenciadas.	48
Figura 27 – Controle proposto para aumentar o compartilhamento de potência na Microrrede.....	49
Figura 29 – Divisão equilibrada de potência ativa (a) e reativa (b) através da utilização do controle Droop proposto pelo autor.....	50
Figura 30 – Circuito de simulação.....	51
Figura 31 – Inversor CC/CA formador de rede como fonte de tensão.....	53
Figura 32 – Inversor CC/CA formador de rede como fonte de tensão.....	56
Figura 33 – Malhas de controle internas aos inversores formadores de rede na simulação.	Erro! Indicador não definido.
Figura 34 – Topologia do inversor de Suporte de Rede utilizada na Simulação.....	Erro! Indicador não definido.
Figura 35 – Malha de controle dos inversores de suporte de rede	Erro! Indicador não definido.
Figura 36 – Topologia do inversor alimentador de rede utilizada na Simulação	Erro! Indicador não definido.
Figura 37 – Malha de controle dos inversores de alimentação de rede... ..	Erro! Indicador não definido.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores Nominiais de operação da Microrrede.....	52
Tabela 2 – Quantificação da variação de cargas nas simulações das Microrredes. [OS AUTORES, 2019].....	52
Tabela 3 – Valores do filtro utilizado na conexão do inversor suporte de rede operando como fonte de tensão [OS AUTORES, 2019].	53
Tabela 4 – Valores dos ganhos do compensador de corrente. [OS AUTORES, 2019].....	54
Tabela 5 – Valores dos ganhos do compensador de tensão. [OS AUTORES, 2019].	54
Tabela 6 – Valores dos parâmetros das curvas de controle Droop. [OS AUTORES, 2019].	54
Tabela – Valores de coeficientes das curvas de controle Droop. [OS AUTORES, 2019].	Erro! Indicador não definido.
Tabela 7 – Valores de coeficientes das curvas de controle Droop. [OS AUTORES, 2019].	Erro! Indicador não definido.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

GD	Geração Distribuída
REN	Resolução Normativa
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
PCC	Ponto de Conexão Comum
DELT	Departamento de Engenharia Elétrica
UFPR	Universidade Federal do Paraná
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
CCM	Controlador Central da Microrrede
SGD	Sistema de Gestão de Distribuição
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i> ou Transistor Bipolar de Porta Isolada
MOSFET	<i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i> ou Transistor de Efeito de Campo Metal-Óxido Semicondutor
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> ou Modulação por Largura de Pulso
MPPT	Maximum Power Tracking
VSI	Voltage Source Inverter, ou Inversor Fonte de Tensão
CSI	Current Source Inverter, ou Inversor Fonte de Corrente

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	CONTEXTO	14
1.2	OBJETIVOS	17
1.2.1	OBJETIVO GERAL	17
1.2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
1.3	ESCOPO	18
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1	MICRORREDE	20
2.1.1	CONTROLE DE MICRORREDES	21
2.2	CONTROLE DROOP	24
2.2.1	CONTROLE DROOP EM MÁQUINAS SÍNCRONAS	25
2.3	INVERSOR DE TENSÃO	27
2.3.1	PAPEL DOS INVERSORES NA MICRORREDE	28
2.3.2	MODULAÇÃO POR LARGURA DE PULSO PWM	29
2.3.3	TRANSFORMADA CLARK-PARK	30
2.3.4	MODOS DE OPERAÇÃO	35
2.3.4.1	ALIMENTADOR DE REDE	37
2.3.4.2	ALIMENTADORES COM CONTROLE P Q	39
2.3.4.3	FORMADORES DE REDE	39
2.3.4.4	SUORTE DE REDE	41
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	47
4	MODELAGEM SIMULINK	51
4.1	CARGAS	52
4.2	INVERSOR SUPORTE COMO FONTE DE TENSÃO DE REDE	52

4.3 INVERSOR SUPORTE COMO FONTE DE CORRENTE **ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.**

4.3.1 MALHA DE CONTROLE DO INVERSOR FORMADOR DE REDE..... **Erro! Indicador não definido.**

4.4 VSI SUPORTE + CSI SUPORTE **ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.**

4.4.1 MALHA DE CONTROLE DO INVERSOR SUPORTE DE REDE **Erro! Indicador não definido.**

4.5 INVERSORES FORMADOR + ALIMENTADOR + SUPORTE **ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.**

4.5.1 MALHA DE Controle DO INVERSOR ALIMENTADOR DE REDE **Erro! Indicador não definido.**

5 RESULTADOS57

5.1 CASO I57

5.2 CASO II57

5.3 CASO III58

6 CONCLUSÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS.....59

7 REFERÊNCIAS60

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO

O Sistema Elétrico de Potência tem passado por mudanças nas últimas décadas. Originalmente, estruturado por grandes usinas geradoras com capacidade de abastecer enormes quantidades de carga, como centros urbanos e indústrias. Em função dessa estrutura, esse sistema é conhecido por operar de forma centralizada, dependendo de um pequeno número de grandes fontes. Normalmente, são elas usinas hidrelétricas, termelétricas ou até nucleares, localizados de forma distante das unidades consumidoras, dependendo de extensas linhas de transmissão que acarretam a maior parte das perdas causadas em um SEP. Além disso, é um sistema que depende majoritariamente de investimentos governamentais de grande porte e se caracteriza por um elevado grau de complexidade (ANTUNES e SILVA, 2018).

Porém, recentemente têm sido implementadas novas fontes nesse cenário, posicionadas próximas às cargas. Geralmente, provenientes de matrizes de energia renováveis, de escala consideravelmente menor, elas trabalham de forma integrada à rede, formando a Geração Distribuída (GD). Através do conceito da GD, é possível gerar grande parte da energia consumida localmente no sistema de distribuição de energia, ou seja, próximo à carga, reduzindo assim as perdas na rede elétrica causadas pela transmissão de energia por longas distâncias.

No Brasil, a GD foi regulamentada primeiramente em 2012 através Resolução Normativa (REN) N°482 da ANEEL – Revisão das Regras aplicáveis à micro e minigeração distribuída, e revisada na REN N°687/2015. Através delas foram dados os primeiros passos para tornar regularizada a aplicação de fontes de pequeno porte no sistema de distribuição. Aliada a crise hídrica que se alastrou pelo país no ano de 2014, foram estimulados esforços para diversificação da matriz energética, dando espaço para o crescimento da geração distribuída (MOTA, 2015). Como pode ser visto na Figura 1, a prospecção de crescimento para o seguimento de fontes microgeradoras de energia para os próximos anos é muito positiva.

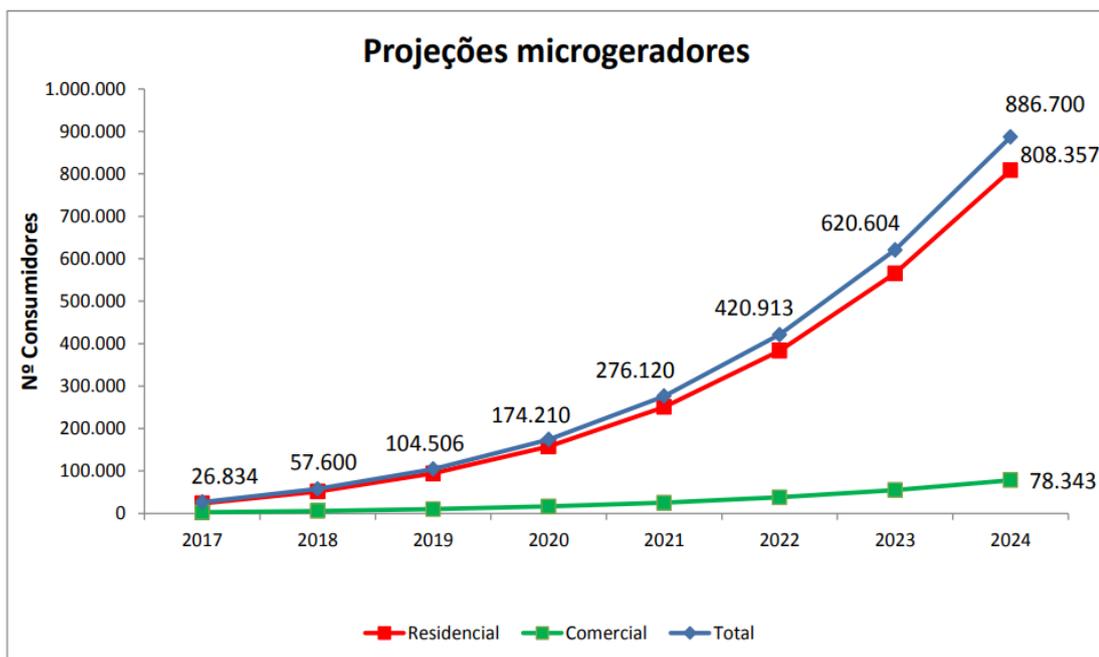


Figura 1 – Projeção de conexões de geradores distribuídos à rede (ANEEL, 2017).

Grandes incentivos acercam a mudança para essa nova forma de estruturar o Sistema Elétrico. Entre eles a facilidade de implementação; o fato de grande parte dessas unidades microgeradoras se utilizam de fontes renováveis de energia, como o sol, o vento e até mesmo hídrica; e a oportunidade para a expansão do uso da rede elétrica. Porém, a utilização de uma geração de forma distribuída pode acarretar também em uma série de dificuldades técnicas. Listando-se em injeção de harmônicos na rede pela conexão dessas fontes à rede acontece através da utilização de inversores de frequência; fluxos de potência bidirecionais; dificuldade na determinação de correntes de curto-circuito, dificultando a instalação de dispositivos de proteção e, principalmente, a obrigação da desconexão da fonte em um evento de falha ou falta de energia, de forma a permitir a operação na rede de maneira segura.

Uma maneira de conter grande parte desses problemas, foi a criação de uma estrutura para implementação dessas fontes, de forma a tratá-las juntamente às cargas. À essa estrutura, denomina-se Microrrede, que se caracteriza pela capacidade de operar tanto de forma conectada quanto isolada à rede de distribuição. Dotada de sistemas de geração, controle e armazenamento, as Microrredes fazem as fontes e cargas serem vistas como uma entidade única pelo Sistema Elétrico de Potência, conectadas a ele através de um único ponto comum de acoplamento (PCA) (LUKASIEVICZ, 2016). O conceito da utilização de

Microrredes pode ser visto na Figura 2, onde existe múltiplas Microrredes conectadas à um mesmo sistema da rede de distribuição.

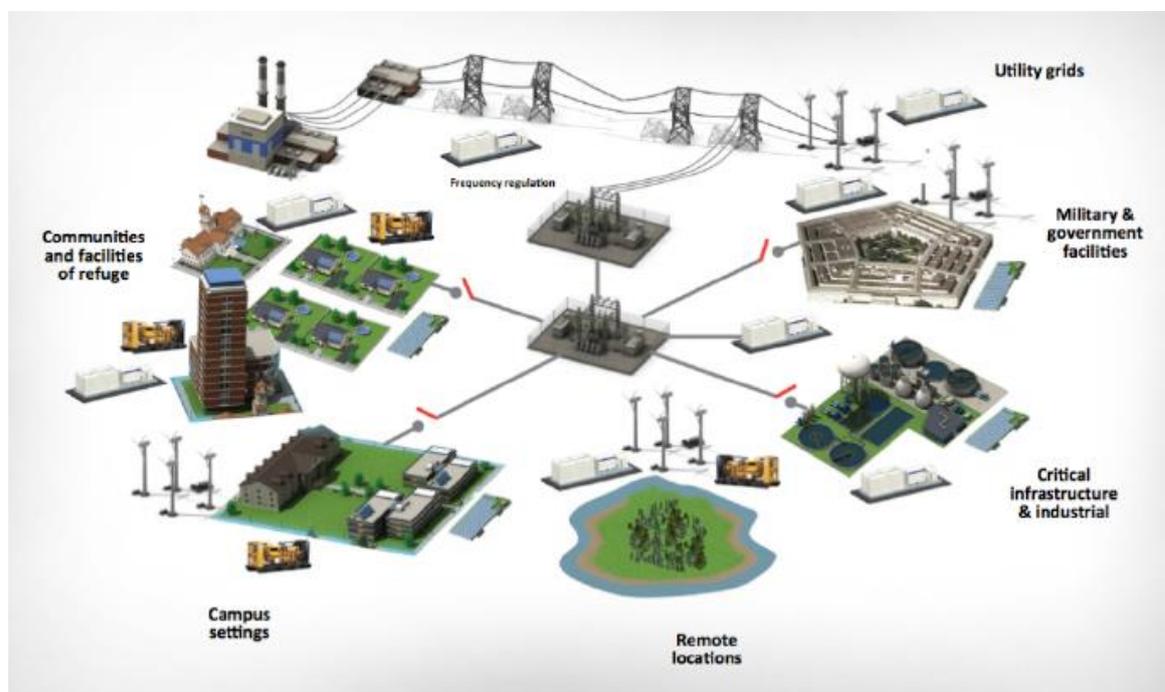


Figura 2 – Conceito e utilização de Microrredes. (EATON, 2016)

A utilização de Microrredes em regiões afastadas, pode ser, também, um grande advento na diminuição do contingente de pessoas sem acesso à energia. Em locais de difícil acesso da rede centralizada, é possível a aplicação delas para trazer energia elétrica para a população. Disso, a importância do estudo dessas estruturas, uma vez que, mundialmente em 2017, o número de indivíduos sem acesso à energia elétrica ultrapassou 992 milhões de pessoas, ou 13% da população mundial (REN21, 2017).

Dentro de uma Microrrede vários elementos geradores contribuem para sua estabilidade e manutenção em uma operação ilhada. Eles podem ser categorizados entre a função que desempenham na Microrrede. Primeiro, os formadores de rede, são responsáveis por fornecer uma referência aos níveis de tensão e frequência. Normalmente, é utilizado uma máquina síncrona (ex.: geradores a diesel, hidroturbina) para tal, visto sua capacidade de operar de forma constante, desejável para manutenção dos parâmetros no evento da Microrrede operar de forma ilhada, porém existem também configurações de inversores de tensão capazes de realizar a formação da rede, conectados a conjuntos de baterias. Segundo, os alimentadores de rede, responsáveis por injetar potência ativa e reativa à rede, de acordo com a

disponibilidade da geração. Geralmente, são utilizadas fontes renováveis (ex.: painéis fotovoltaicos, geradores eólicos) conectadas à inversores de tensão alimentadores, trabalhando com um controle de injeção de corrente. Por terceiro, os suportes de rede, responsáveis por prestar auxílio à manutenção dos níveis de amplitude de tensão e frequência na Microrrede. Constituídos por bancos de armazenadores de energia conectados à conversores de potência, que trabalham de forma bidirecional, ou seja, têm a capacidade de absorver ou injetar potência na Microrrede, de acordo com a necessidade.

O controle utilizado pelos conversores de potência para a manutenção dos parâmetros de tensão (amplitude e frequência) na Microrrede é o Controle Droop. Original de máquinas síncronas, ele é aplicado aos inversores de tensão permitindo a regulação da injeção de potência ativa e reativa na rede de acordo com a variação desses parâmetros. Estas malhas são aplicadas à todos os elementos geradores presentes na Microrrede, permitindo com que eles equilibrem o fornecimento de potência para atender a demanda. Dessa forma que eles trabalhem de forma homogênea na função de manter os níveis de tensão e frequência e compartilhem a demanda das cargas.

O presente estudo fará simulações para o entendimento e gerar preposições sobre o controle droop aplicado à conversores de potência, focando na estabilidade da rede a que eles estão conectados. Ou seja, aplicar as malhas de controle de modo a garantir a preservação dos níveis de tensão e frequência dentro de uma faixa de operação aceitável.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo do trabalho é a análise de uma Microrrede dotada dos vários tipos de elementos geradores e armazenadores (com a aplicação do Controle Droop) e cargas variáveis, através de simulações utilizando-se do software computacional MATLAB/Simulink.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar o comportamento de um inversor de tensão no modo de suporte de rede com controle de tensão, com a variação de cargas através de simulação no software computacional MATLAB/Simulink.
- Analisar um inversor de tensão no modo de suporte de rede com controle de corrente, com a variação de carga através de simulação no software computacional MATLAB/Simulink.
- Analisar os dois tipos de inversores de tensão no modo de suporte de rede de modo a visualizar o compartilhamento de carga através do Controle Droop através de simulação no software computacional MATLAB/Simulink.
- Analisar o comportamento de um inversor de tensão no modo de alimentador de rede através de simulação no software computacional MATLAB/Simulink
- Adicionar à simulação dos dois inversores de suporte de rede o inversor alimentador.
- Variar o ganho de Controle Droop na simulação da Microrrede, de modo a observar sua importância no compartilhamento de cargas.

1.3 ESCOPO

No capítulo 2 do presente trabalho, Fundamentação Teórica, será apresentado o embasamento técnico já consolidado. Serão apontados conceitos que permitirão a aplicação do objetivo geral de implementação da Microrrede e o controle envolvido.

No capítulo 3 Revisão Bibliográfica, serão expostas pesquisas atuais, de forma a definir o rumo tomado pelo trabalho desenvolvido. Será exposto o Estado da Arte das áreas que envolvem a extensão desse projeto.

No capítulo 4, Simulações, será apresentada a estrutura das simulações desenvolvidas pela equipe, expondo o arranjo dos elementos apresentados e estudados nos itens anteriores, através do software MATLAB/Simulink.

No capítulo 5, Teste e Análise de Resultados, serão expostos os resultados das simulações desenvolvidas anteriormente, com uma discussão sobre eles.

No capítulo 6, Conclusão e Trabalhos Futuros, será feita as principais conclusões do trabalho, de forma a analisar os resultados de uma ótica ampla, e analisar se os objetivos foram alcançados. Propor novas análises sobre o tema, com os resultados que serão atingidos.

No capítulo 7, Referências Bibliográficas, serão listadas todas as publicações de textos, livros, artigos, sites e documentos que foram utilizados para a produção deste trabalho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 MICRORREDE

Aliado à crescente utilização de fontes geradoras de pequena escala de forma distribuída na rede, se faz de grande necessidade unidades de controle conectadas a elas e também às cargas. Assim, uma Microrrede trata-se de uma topologia de cargas, geradores e armazenadores, que possa trabalhar tanto de forma interligada à rede quanto de forma isolada, dependendo das condições. Em sua essência, na Microrrede, as cargas e geradores formam uma entidade única, podendo ela fornecer ou demandar energia quando conectadas à rede principal. As fontes são conectadas à Microrrede por meio de conversores baseados em eletrônica de potência de forma a permitir a flexibilidade necessária para garantir sua operação estável (LEONARDO). Um exemplo de estrutura de uma Microrrede pode ser visto na Figura 3 MR01, onde são observadas fontes de energia, conectadas através de conversores baseados em eletrônica de potência, filtros de sinal para retirar ruídos e distorções harmônicas geradas por esses elementos, cargas variáveis e estáticas, e o Ponto de Conexão-Comum (PCC), que irá fazer o acoplamento entre a Microrrede e a rede de Distribuição. Essa estrutura foi baseada na Microrrede que está em desenvolvimento e implantação no Departamento de Engenharia Elétrica (DELT) da Universidade Federal do Paraná (UFPR)

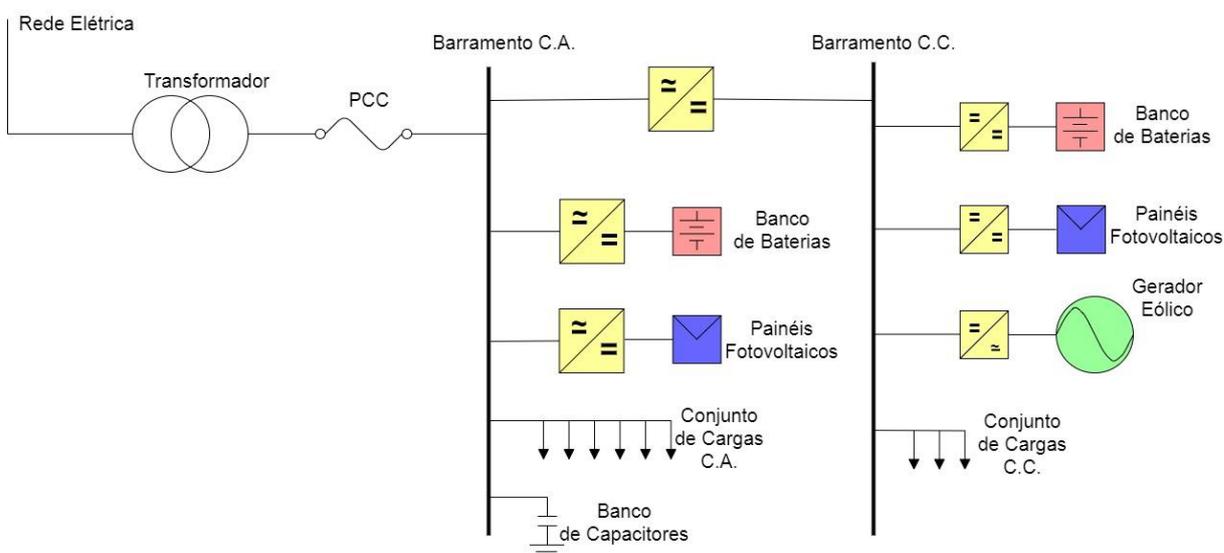


Figura 3 - Representação simplificada de uma Microrrede. [OS AUTORES, 2019]

Devido à sua capacidade de operação ilhada, a estrutura de Microrredes, utilizando de fontes alternativas e renováveis de energia, pode ser instalada em regiões longínquas onde a rede de distribuição não tem a capacidade de chegar, ou até mesmo ilhas. Antes do advento da Microrrede, essas regiões dependiam de Geradores à diesel, somente operando em horas específicas diariamente, limitando a utilização e diminuindo a confiança na rede. Porém, com o uso dessa nova estrutura, é possível estender o uso da energia na região atendida e aumentar a confiabilidade da rede, além de promover o uso de fontes de energia sustentável.

Por outro lado, quando conectada à rede de distribuição, a Microrrede pode ser vista por este como uma carga variável. Do ponto de vista da rede, esse conglomerado de fontes distribuídas e cargas, possuem fluxo de potência ativa e reativa variável no PCC, variando de acordo da geração e consumo instantâneo da Microrrede. Quando conectadas de forma individual, geradores distribuídos podem trazer problemas ao invés de solucioná-los. Alguns exemplos são: Potência ativa e reativa injetada em excesso e sem controle, ultrapassando limites de tensão na rede de distribuição; injeção de harmônicos à rede, pela utilização de inversores de tensão; impossibilidade de fluxo reverso de potência nos transformadores da rede de distribuição entre outras dificuldades.

Como na Microrrede grande parte das fontes e armazenadores são conectados através de inversores de tensão baseados em eletrônica de potência, eles possuem a capacidade de controle e ajuste do nível de injeção à Microrrede. Graças a essas características, a Microrrede possui uma dinâmica capaz de mitigar e até eliminar alguns dos problemas citados acima. Essa flexibilidade de controle permite à Microrrede se apresentar para a rede principal como uma única unidade controlada que atende às necessidades locais de confiabilidade e segurança [RESE, 2012].

As Microrredes têm ainda um aumento de sua confiança no fornecimento de energia pela capacidade dual de operação. Em eventos de falta e de instabilidade de energia da parte do SEP, a Microrrede pode ser desconectada e operar ilhada de forma momentânea, garantindo a continuidade do fornecimento de energia às cargas.

Para que isso ocorra, na estrutura das Microrredes, constam elementos armazenadores de energia, sendo fundamental para sistemas ilhados. Entre esses dispositivos, listam-se as baterias eletroquímicas e super-capacitores, sendo as baterias os mais utilizados. Somente através do uso de armazenadores é possível a operação ilhada, uma vez que em momentos que as fontes não suprem as cargas, são acionados os inversores conectados a esses dispositivos, de forma a manter os níveis de tensão e frequência da rede.

O padrão que a rede elétrica de distribuição segue é determinado pelo módulo 8 do PRODIST, de qualidade de energia elétrica. Nele, são definidos os indicadores a serem seguidos na rede de distribuição. Os valores de tensão em regime permanente, por exemplo, devem variar entre 95% e 105% do valor nominal de tensão para estarem dentro da faixa adequada. Já os valores de frequência devem variar entre 59,9Hz e 60,1Hz [PRODIST, 2018]. Para que esses valores sejam mantidos dentro de uma Microrrede desconectada, se faz necessário um controle adequado de seus elementos, de maneira a garantir o perfeito funcionamento dos itens conectados a ela. A seguir, será abordada uma análise sobre esse controle.

2.1.1 CONTROLE DE MICRORREDES

Pelo fato da maioria dos elementos pertencentes à Microrrede estar conectado ao barramento principal através de um inversor de tensão, é possível acrescentar circuitos de controle, adicionando dinâmica às fontes, armazenadores e cargas. Dessa forma, várias são as técnicas de controle aplicadas aos inversores, a fim de manter os parâmetros fundamentais da Microrrede operando de maneira estável.

Os inversores, mesmo quando utilizados de maneira separada no sistema de distribuição, possuem seu próprio controle interno, para regular níveis de tensão e corrente injetados na rede, que também será introduzido nos tópicos seguintes. Porém, o mais importante é listar técnicas de controle que contribuam com a estabilidade da rede utilizando os inversores de forma conjunta, ou seja, malhas que deem a eles um dinamismo capaz de variar seu fornecimento em prol do funcionamento da rede dentro da faixa de operação.

É importante esclarecer que ainda não existe uma estratégia única de controle que se aplique a todo e qualquer tipo de Microrrede, por isso serão citadas algumas das técnicas mais utilizadas. Na Figura 4 é apresentado um esquemático com as estratégias para as operações ilhadas de Microrrede mais utilizadas atualmente.

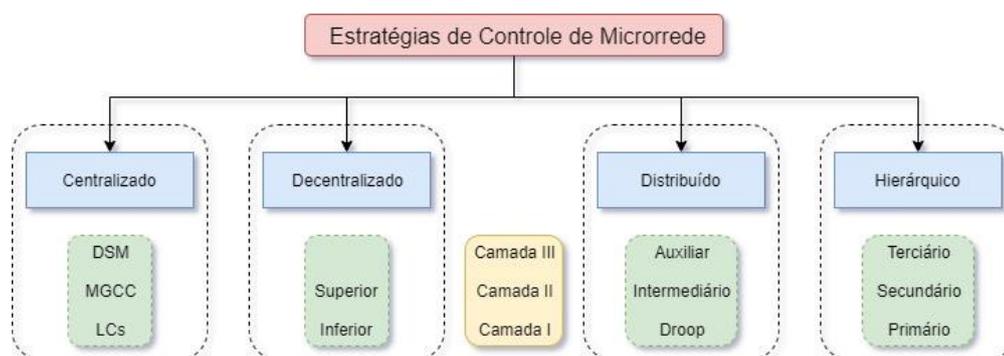


Figura 4 – Estratégias de controle de parâmetros de tensão de Microrredes. [SASCHIDANANDA, 2018].

Uma primeira estratégia é utilizar uma central de comunicação entre esses dispositivos, de forma a monitorar e gerenciar o funcionamento de cada um de forma dinâmica. Se utilizando do conceito de Smart Grids, o Controle Centralizado faz o uso de sensoriamento e protocolos de comunicação de alta velocidade na rede de distribuição para monitorar, controlar e tomar ações de forma remota. Em um primeiro nível, há troca de informações entre os inversores na Microrrede e o Controlador Central da Microrrede (CCM). Existem também sincronias entre múltiplas Microrredes, que se utilizam de um Sistema de Gestão de Distribuição (SGD). No Controle Centralizado é necessário garantir que todos os dispositivos terão acesso contínuo à central, com baixa atenuação de sinal, o que pode ser de difícil implementação e alto custo, quando comparado à outras técnicas de controle [KORUKONDA, 2017]. Porém é uma boa aplicação para Microrredes de pequeno porte que não necessite percorrer grandes distâncias para que a comunicação com o servidor central ocorra.

Outra estratégia de controle, é o Controle Descentralizado, o qual faz o uso de sensoriamento e malhas de controle pré-definidas, com a tomada de decisão embutida aos inversores de tensão que conectam as fontes de energia à Microrrede. Possui maior confiabilidade e menor tempo de resposta dos agentes (inversores), pois, geralmente, é utilizado para Microrredes maiores, ou com maior número de

fontes. Nesse esquema de controle, são eleitos dois níveis de controle nos agentes, denominados nível superior e nível inferior [SASCHIDANANDA, 2018]. O inferior, com resposta mais rápida, é responsável pela divisão equilibrada de carga entre as fontes e o controle dos níveis de tensão e frequência. Já o superior, se interessa em manter o fluxo de potência equilibrado e livre de perdas para operações em *Tie-Grid*¹. Focaremos os estudos desse trabalho na forma descentralizada, sem necessidade de uma comunicação central, em especial no nível inferior, pelo foco na situação *Off-Grid*². Nesses casos, a adição de novos elementos à Microrrede se torna mais simples, de forma *plug-and-play*³, uma vez que não há necessidade de instalação e sincronismo com algum controlador central. Se faz necessária, somente, a parametrização correta de seus controladores para que operem como o desejado.

Dando sequência, tem-se o modo de Controle Distribuído. Possui as características do controle Descentralizado juntamente ao Centralizado, com a adição de mais um nível de controle, onde são implementados controladores de carga, possibilitando escolher quais seriam as priorizadas no caso de operação ilhada. É de interesse que todas elas funcionem normalmente, assim que forem solicitadas. Porém, preferências podem ser inseridas em determinados tipos de Microrredes, nas quais existam cargas que sejam mais imprescindíveis do que outras. Dessa forma, é possível obter algumas das vantagens do sistema descentralizado, em uma estrutura híbrida que permite o trabalho independente de seus controladores centrais, mas também opera de forma a obter um sistema otimizado, controlando suas cargas. A partir deste modelo, foi pensado em um novo sistema Hierárquico, que trabalha com três níveis de controle, cada um com a sua aplicação, de forma a aprimorar as variáveis de operação da Microrrede. O primeiro nível, pensado para a regularização de tensão e frequência, praticamente instantânea, operando em milissegundos. O segundo, voltado aos erros em regime

¹ *Tie-Grid*: tipo de operação de Microrrede em que ela se encontra conectada à rede de distribuição.

² *Off-Grid*: tipo de operação de Microrrede em que ela se encontra descontada à rede de distribuição.

³ *Plug-and-play*: método de aplicação de aparelhos de fácil instalação e configuração automática.

permanente das gerações, uma vez que opera mais lentamente na escala de minutos. Por último, o terceiro nível mais lento ainda, é voltado para o despacho econômico e otimizado da Microrrede [SASCHIDANANDA, 2018].

Independente da estratégia e estrutura, elas se utilizam de técnicas de controle das mais variadas, sempre de modo a otimizar os parâmetros de operação da Microrrede. Entre elas, a que será o grande foco de estudo do trabalho, o Controle Droop, originário de máquinas síncronas, pode também ser simulado nos inversores de frequência, portanto é de extrema importância compreender o comportamento nas máquinas, para que possa ser replicado e simulado nos inversores de frequência que serão simulados.

2.2 CONTROLE DROOP

As Microrredes que se utilizam de controles descentralizados, não possuem comunicação entre os conversores, porém para manter-se estável, se faz necessária uma maneira de sincronizá-los em um cenário *Off-Grid*, onde não há referência da rede principal para que eles possam seguir. Uma forma de fazê-lo é a aplicação do controle Droop.

O controle Droop é uma característica nativa de geradores síncronos, dotados de governadores ou motores para seu acionamento. Em essência, ele irá aplicar um dinamismo ao gerador que terá, assim, uma variação no seu fornecimento de potência de acordo com a variações de parâmetros de tensão da rede. Com a variação de frequência na rede, o gerador irá compensar com o aumento de sua potência ativa, já para o caso de variação de amplitude de tensão na rede, a compensação será de potência reativa, seguindo o comportamento da Figura 5.

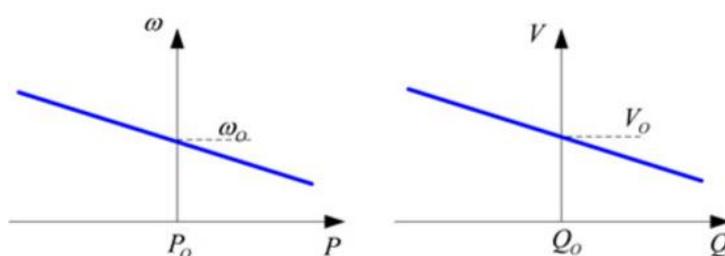


Figura 5 - Curva de controle Droop. [WU, 2016]

Os inversores de tensão utilizados para conectar fontes às Microrredes são capazes de simular esse comportamento de máquinas síncronas através da aplicação de malhas de controle. Essas variam dependendo do modo de operação do inversor, que serão explicadas no desenvolver do trabalho.

Porém, antes de discutir a aplicação às Microrredes, será feita uma breve explicação sobre o princípio de funcionamento desse controle nas máquinas síncronas de modo a atingir o pleno conhecimento dessa propriedade.

2.2.1 CONTROLE DROOP EM MÁQUINAS SÍNCRONAS

No Sistema Elétrico, as máquinas elétricas são responsáveis pela maior parte da geração e do consumo, uma vez que elas são capazes de operar de duas maneiras distintas. Como gerador, ao rotacionar seu eixo através de uma fonte de potência mecânica, e assim produzir uma tensão trifásica em seus terminais; ou então como motor, absorvendo energia elétrica de uma fonte alimentadora, produzindo torque à uma carga conectada ao seu eixo. Em qualquer um desses cenários, se faz necessária a presença de um campo magnético no núcleo dessas máquinas. Com relação à sua velocidade de operação, elas também são separadas em dois tipos: a máquina síncrona, que opera com rotação constante, seguindo a rotação do campo magnético girante, ou de forma assíncrona, com variação livre dessa velocidade.

São mais utilizadas as máquinas síncronas para a função de geração, independente de sua escala. Seja no caso da geração centralizada quanto distribuída, os geradores mais utilizados são de natureza síncrona, apesar de ocorrer a utilização de geradores assíncronos de pequeno porte.

A potência mecânica inserida no eixo dos geradores precisa ser controlada para ajustar-se à potência elétrica que eles fornecem ao sistema a cada instante [ANTONIO SILVA, 2016]. Através da estrutura chamada Governador, é feito o controle de velocidade das turbinas que rotacionam o eixo mecânico do gerador. Turbinas que rotacionam, seja hidráulica, a vapor, a gás, óleo diesel ou outro tipo de combustível, necessitam de um controle para manter o nível de velocidade da máquina.

No caso de aplicação da máquina à uma Microrrede, há grande variação no sistema em que será aplicada, com isso o controle de velocidade se faz ainda mais necessário. Variações agressivas em valores de frequência e tensão, assim como da potência motriz de alimentação do gerador, podem desestabilizar a máquina e levando o sistema como um todo abaixo. Dessa forma, é de extrema importância a aplicação de um sistema de controle capaz de manter a velocidade de operação da máquina dentro de uma faixa aceitável. Após um distúrbio, quando a velocidade da máquina se afasta do valor desejado devido à desigualdade entre a potência elétrica de saída e a potência mecânica de entrada, o regulador de velocidade providencia alterações no fornecimento da potência mecânica, no propósito de retornar à velocidade do gerador para o prefixado valor desejado [ANTONIO SILVA, 2016].

Trata-se de um controle de velocidade, capaz de fazer com que múltiplas máquinas síncronas se conectem paralelamente e se utilizem de uma faixa de operação aceitável. Denominado controle droop ou estatismo, é uma inclinação que relaciona uma variação de frequência a uma variação de potência ($\Delta\omega/\Delta P$), seguindo o comportamento mostrado na Figura 6 a seguir.

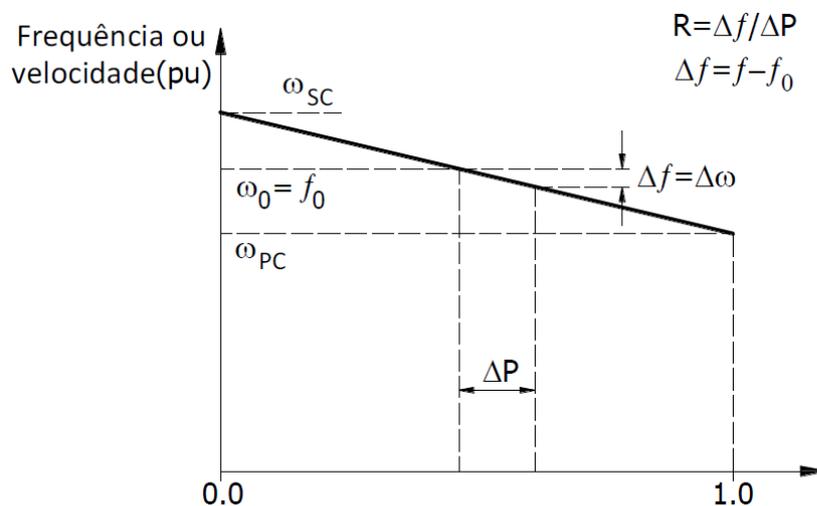


Figura 6 – Curva característica do Controle Droop, aplicada à geradores síncronos, [KUNDUR, 1999].

A partir da imagem acima, é possível entender mais sobre essa característica das máquinas síncronas, cada uma tendo sua própria inclinação. Com isso, será a angulação “R” descrita na imagem que determinará a divisão de potência entre os geradores de um mesmo sistema. Ou seja, através dessa propriedade, é possível equilibrar a contribuição no fluxo de potência de um sistema, independente de sua

escala. Quando mais de uma máquina síncrona dotada de um regulador com controle *droop* operar no mesmo sistema, a tendência é que todas elas trabalhem com a mesma velocidade, com contribuição de potência diferente, de acordo com sua inclinação característica. Um exemplo pode ser observado na Figura 7, onde dois geradores atuam no mesmo sistema, dividindo a demanda total de cargas.

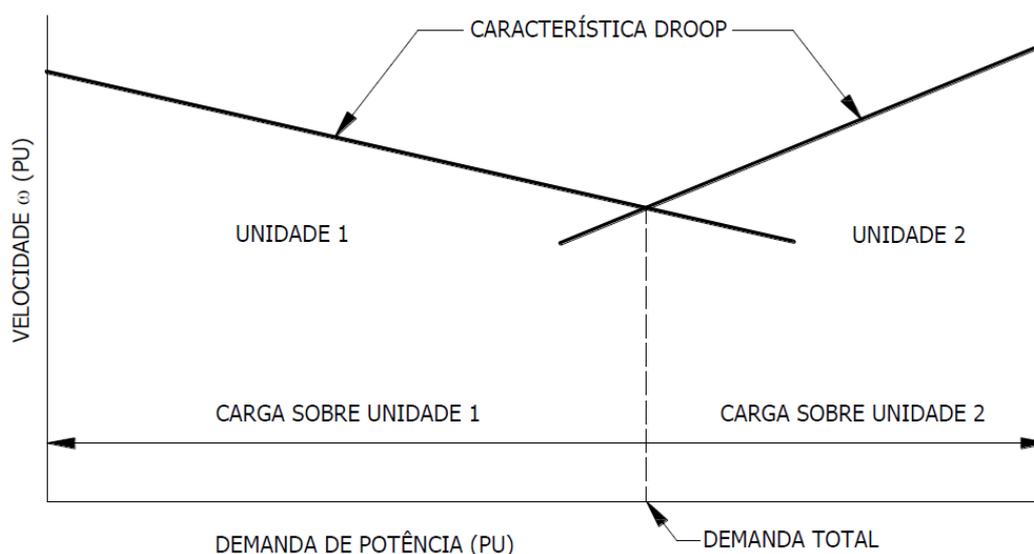


Figura 7 – Associação de geradores com controle droop em um mesmo sistema [KUNDUR, 1999].

Essa característica é algo muito desejável para o controle de parâmetros de tensão na Microrrede, e foi pensando nisso que foram implementadas malhas de controle capazes de simulá-la em inversores de frequência. Dessa forma, é possível gerenciar a divisão de potência entre fontes presentes na Microrrede, para não as sobrecarregar e manter o sistema estável, além de determinar a faixa de operação ao qual o sistema poderá operar.

Para explicar a aplicação do controle Droop nos inversores utilizados na Microrrede, faremos antes uma explicação detalhada desses dispositivos, esclarecendo a sua estrutura, funcionamento e modos de operação.

2.3 INVERSOR DE TENSÃO

Utilizado para conectar as diversas fontes e armazenadores do sistema ao barramento CA da Microrrede, o Inversor de Tensão é um conversor eletrônico de potência baseado em semicondutores, como por exemplo IGBT's e Mosfet's, que converte sinais elétricos contínuos em alternados.[1] Ele gera corrente ou tensão

sinusoidal com frequência e magnitude controláveis [2]. A Figura 8 mostra o conceito de um inversor de frequência de dois estágios.

O primeiro estágio, composto pelo conversor CC-CC, ou *Buck-Boost* (Abaixador-Elevador, em português) é responsável pela adequação do sinal elétrico contínuo proveniente da fonte, ao nível de tensão adequado para o barramento CC de interface. Ele permite a máxima extração de energia da fonte. O segundo estágio, composto pelo conversor CC-CA, converte o sinal contínuo da saída do conversor CC-CC em alternado, CA, para injeção na rede [9].

A Geração Distribuída utiliza tecnologias avançadas como células de combustível, geração fotovoltaica e eólica. Essas fontes não possuem níveis de tensão e corrente que podem ser aplicadas diretamente à rede local, desta forma, requerem um inversor de interface para transformar e fornecer energia de forma compatível à utilizada na rede.

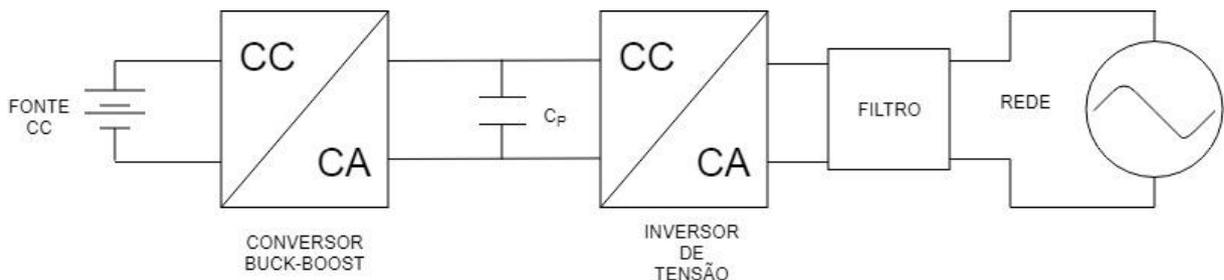


Figura 8 - Conceito do inversor de tensão de dois estágios [OS AUTORES, 2019].

O presente trabalho consiste no estudo do controle dos parâmetros de saída do inversor, ou seja, do lado da rede ou Microrrede, desta forma não abordaremos o funcionamento e controle do conversor CC/CC.

2.3.1 PAPEL DOS INVERSORES NA MICRORREDE

Pela crescente relevância da Geração Distribuída na rede elétrica, a importância dos inversores de tensão é proporcional, uma vez que eles farão a conexão dessas fontes ao sistema de distribuição. Eles possuem alto grau de controle e operabilidade quando comparados aos geradores convencionais (máquinas síncronas). Esta característica permitirá que tenham um papel importante na manutenção da estabilidade da rede elétrica [6].

Além disso, poderão operar de forma ilhada, formando Microrredes, controlando diretamente as variáveis da rede elétrica, como níveis de tensão e frequência, atuando como os principais responsáveis pela estabilidade de operação do sistema. Conectado à rede ou operando de forma ilhada, necessita de métodos de controle dos sinais de saída para adequado funcionamento [3], abordados a seguir.

2.3.2 MODULAÇÃO POR LARGURA DE PULSO PWM

A Modulação de Largura de Pulso, em inglês, *Pulse Width Modulation* (PWM) determina a duração dos estados fechado e aberto durante um chaveamento dos semicondutores dos inversores, a fim de alterar o valor médio de seu sinal de saída. É a forma mais utilizada para controle do chaveamento num inversor de frequência e, por consequência, seu sinal de saída. Para explicar o funcionamento, abordaremos inicialmente a aplicação em um conversor monofásico ponte completa (Ponte-H), cuja operação é mais simplificada, porém com o mesmo princípio dos trifásicos utilizados na simulação do trabalho.

Um conversor monofásico de ponte completa, representado na Figura 9, é composto por quatro chaves semicondutoras, formadoras da ponte H, com uma fonte contínua de tensão em sua entrada. O sinal de saída é gerado entre os pontos A e B. As chaves são fechadas de forma alternada em pares cruzados. Quando S1/S4 estão fechadas, S2/S3 devem estar abertas e vice e versa, de forma que a diferença de potencial entre os pontos A e B seja invertida a cada permuta de operação das chaves, gerando pulsos alternados de saída. O ciclo de trabalho, ou seja, a duração em que as chaves se mantêm fechadas e abertas determina o valor médio do sinal de saída.

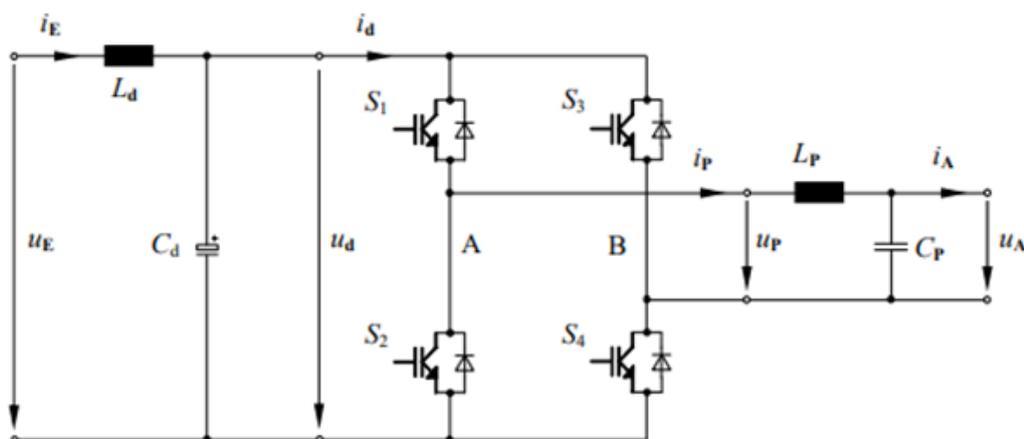


Figura 9 – Conversor monofásico (a) Ponte H (b). [14]

A lógica para o controle da largura do pulso é feita através da comparação de duas ondas: uma triangular, com amplitude e frequência constantes e um sinal de referência a ser gerado na saída do conversor, com amplitude e frequência podendo ser fixas ou variáveis. Quando as duas ondas se cruzam, obtém-se o ponto de inversão das chaves, conforme Figura 10. Por gerar somente os níveis $+U_d$ e $-U_d$ em sua saída, é denominado inversor de dois níveis.

Através destes pulsos consideravelmente rápidos, atualmente entre 2 kHz a 16 kHz, e com a aplicação de filtros passa baixa na saída, é possível gerar sinais sinusoidais compatíveis ao sistema elétrico, geralmente em 50 ou 60 Hz.

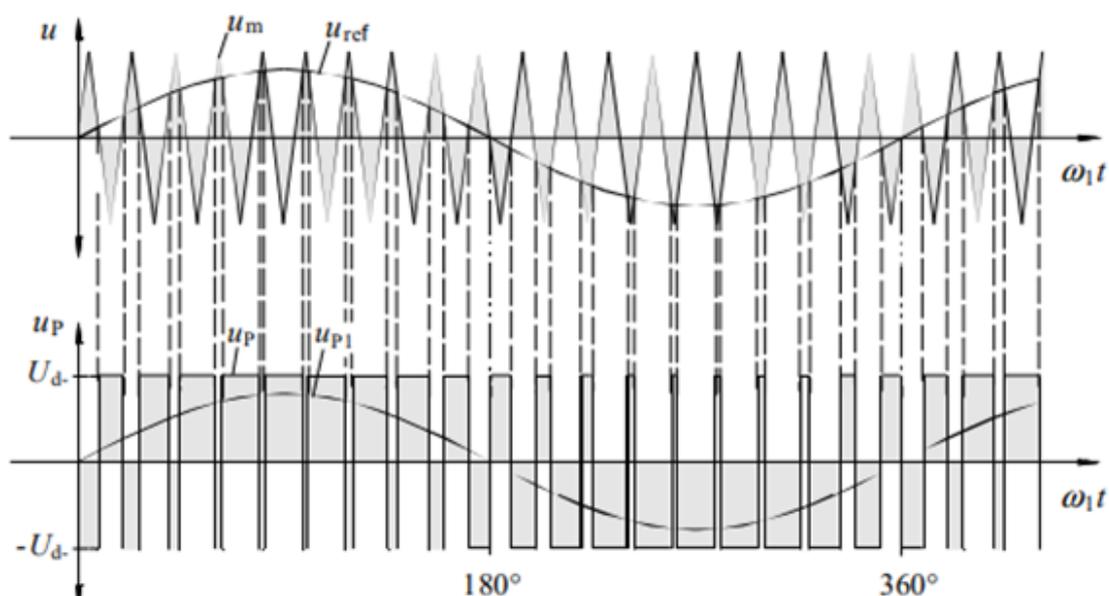


Figura 10 – Modulação por Largura de Pulso de dois níveis. [14]

2.3.3 TRANSFORMADA CLARK-PARK

A tensão de saída dos inversores de tensão tem característica trifásica e senoidal para alimentar os barramentos CA da Microrrede. Para nivelar essa tensão, é necessário o seu sensoriamento e controle, de forma a fornecer exatamente o que a rede precisa para manter-se dentro de uma faixa de operação aceitável. O controle de sinais trifásicos, independente para cada fase, pode ser funcional porém é ineficiente, pois gera interferências entre si. Para mitigar este problema, aplica-se um método para o condicionamento do sinal trifásico, processando e controlando-os de maneira conjunta. Denominado controle vetorial, ele depende de duas transformadas, capazes de converter o sinal trifásico e alternado para dois sinais contínuos. São as transformadas de Clark e Park e a representação do condicionamento feito por elas pode ser vista na figura 11.

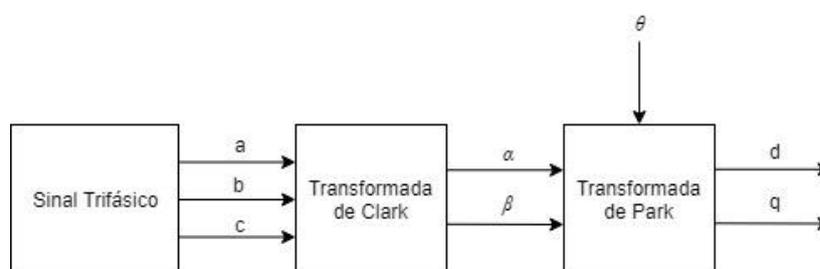


Figura 11 – Blocos funcionais

Em um sistema trifásico equilibrado, as 3 tensões senoidais podem ser representadas em forma fasorial, como na figura TCP02. Os fasores são representações de um sinal senoidal em um plano real-imaginário. O vetor resultante da soma das três fasores é demonstrado através do vetor espacial \vec{V}_r , e cada uma de suas projeções no sistema fasorial como V_{ar} , V_{br} e V_{cr} . O vetor resultante tem módulo e rotação constante, como no esquemático representado na Figura 12.

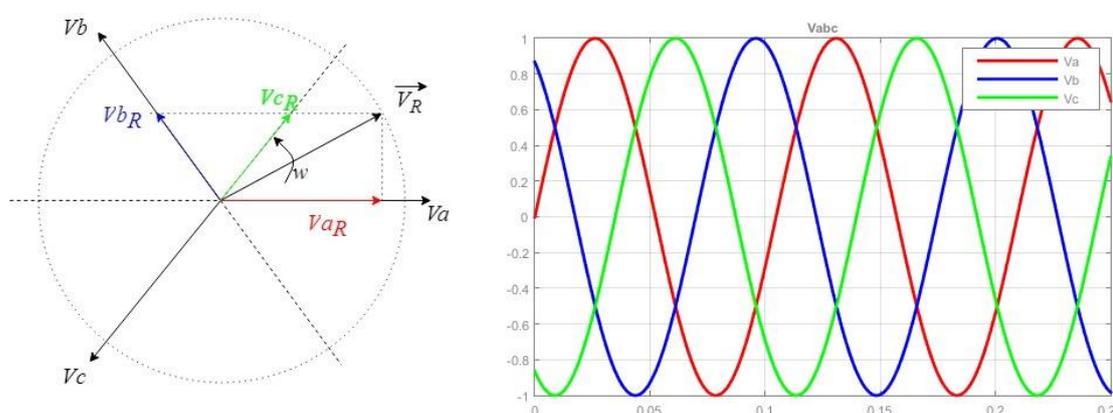


Figura 12 – Representação Fasorial de um sistema trifásico equilibrado.

A primeira transformação do sinal trifásico é a transformada de Clarke, a qual representa os vetores fasoriais das fases a, b e c em um novo plano α e β . As projeções dos fasores podem ser calculados para o novo plano com a seguinte equação:

$$V_{\alpha\beta 0} = T_{\alpha\beta 0} V_{abc} \quad (1)$$

Onde:

V_{abc} - Tensões trifásica nas coordenadas abc;

$T_{\alpha\beta 0}$ - Matriz de transformação;

$V_{\alpha\beta 0}$ - Tensões trifásica nas coordenadas $\alpha\beta 0$.

A Figura 13 mostra a decomposição do vetor resultante de um sistema trifásico sem componente de sequência zero em um sistema de referência $\alpha\beta$.

A matriz de transformação $T_{\alpha\beta 0}$ resulta da projeção do vetor resultante nos novos eixos e pode ser representada da seguinte forma:

$$T_{\alpha\beta 0} = \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (2)$$

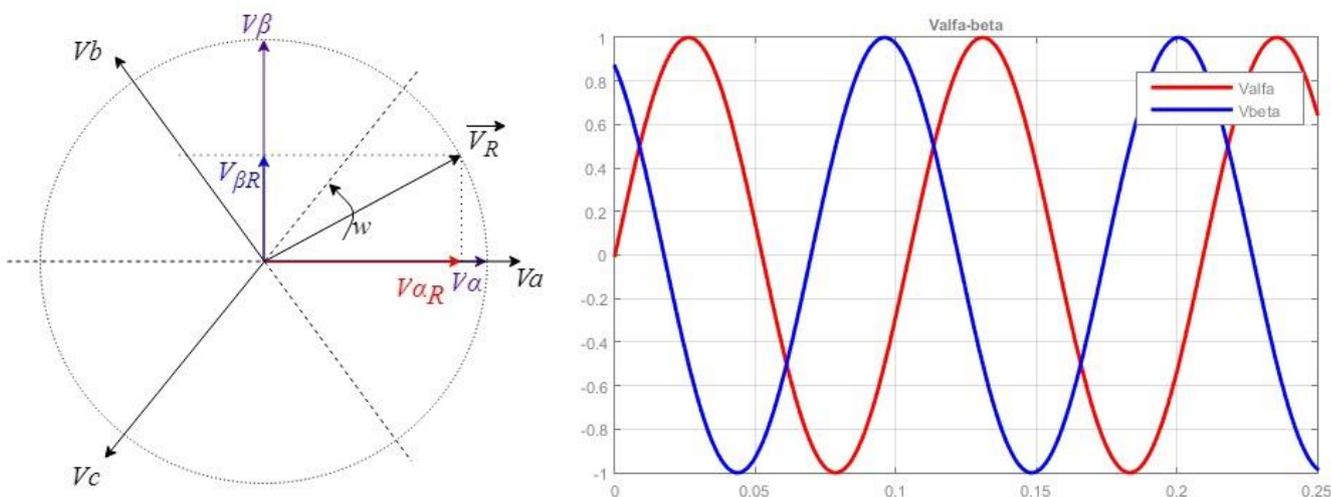


Figura 13 – Decomposição de um sistema trifásico em um sistema de referência α e β .

Considerando as tensões trifásicas representadas como:

$$V_{abc} = \begin{bmatrix} V \sin(\theta) \\ V \sin(\theta - 2\pi/3) \\ V \sin(\theta + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (3)$$

Assim, o sinal transformado se torna:

$$V_{\alpha\beta 0} = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} V \sin(\theta) \\ V \cos(\theta) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

O terceiro elemento da transformada se trata da componente de sequência zero do sinal trifásico. Para um sistema equilibrado, esse elemento recebe $V_0 = 0$ e a componente $V_\alpha = V_a$, ou seja, a componente α da transformada está em fase com a componente a do sinal trifásico.

A fim de recondicionar o sinal de saída novamente, para que ele opere de maneira contínua, é aplicada a transformada de Park, ou dq. Criado por Robert H. Park, ela adiciona um sistema cartesiano girante na mesma velocidade do vetor resultante V_{abc} .

Ela pode ser calculada da seguinte maneira:

$$V_{dq} = T_{\alpha\beta dq} V_{\alpha\beta} \quad (5)$$

Sendo:

$V_{\alpha\beta}$ – Tensões em referência de $\alpha\beta$;

$T_{\alpha\beta dq}$ – Matriz de transformação $\alpha\beta$ para dq;

V_{dq} – Tensões transformadas.

A Figura 14 demonstra como a transformada opera. É possível perceber que a nova coordenada rotaciona juntamente ao eixo resultante girante do sinal trifásico.

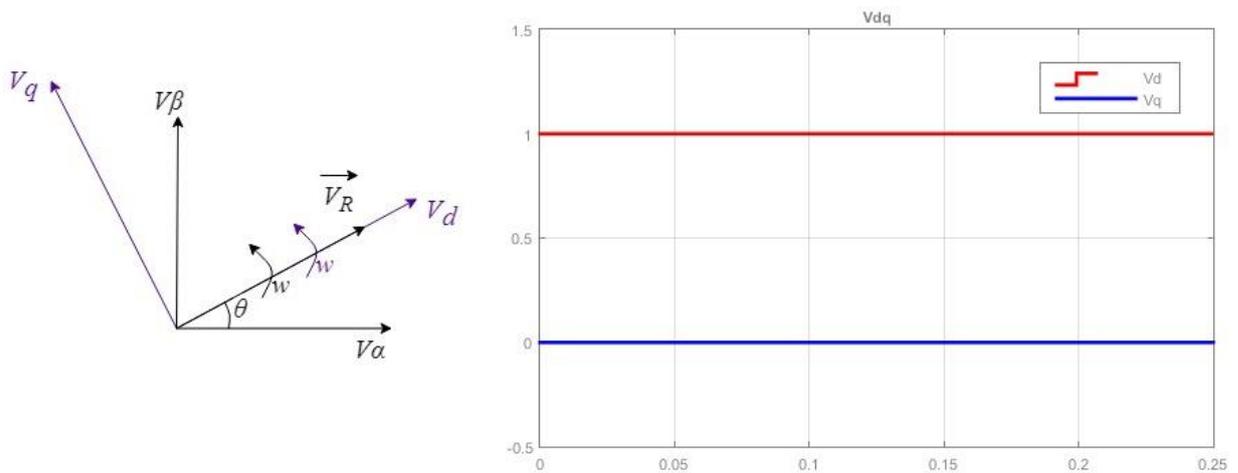


Figura 14 – Princípio de operação da transformada de Park.

A matriz de transformação pode ser descrita da seguinte forma:

$$T_{\alpha\beta dq} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (6)$$

Na transformada de Park, a tensão V_α (ou o valor de V_{abc} em $t = 0$) estará sempre em fase com o ângulo da coordenada, caso o sistema não seja perturbado. Portanto, toda vez que for realizada essa transformada, é informado o valor desse ângulo θ .

Assim, temos dois sinais contínuos, ou seja, invariantes no tempo, que fazem a representação de um sinal trifásico variante de forma senoidal. Simbolizado pelas coordenadas V_d e V_q , ou, coordenada direta e em quadratura, elas são capazes de representar o sinal de saída dos inversores de maneira mais simples e dinâmica para seu controle de forma conjunta.

Após a realização da compensação desses dois sinais, para que ele seja realimentado ao inversor, é necessário que haja a transformação inversa deles. Segue o cálculo para as transformadas inversas de Clark e Park:

$$V_{\alpha\beta} = T_{\alpha\beta dq}^{-1} V_{dq} \quad (7)$$

Sendo a matriz de transformação inversa de Park descrita como:

$$T_{\alpha\beta dq}^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & -\sin(\omega t) \\ \sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix} \quad (8)$$

Dando sequência, é aplicada uma transformada inversa de Clark, sendo calculada da seguinte forma:

$$V_{abc} = T_{\alpha\beta}^{-1} V_{\alpha\beta} \quad (9)$$

Sendo a matriz de transformação podendo ser descrita como:

$$T_{\alpha\beta}^{-1} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1/\sqrt{2} \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 & 1/\sqrt{2} \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (10)$$

Assim, após a transformação inversa, o sinal trifásico passará o sinal para o Modulador de Largura de Pulso, que dará a informação de chaveamento para os transistores internos ao inversor, e regularizar o seu sinal de saída.

2.3.4 MODOS DE OPERAÇÃO

Previamente às análises das simulações da microrrede formada por inversores de potência, é importante a apresentação e classificação de suas malhas de controle para entendimento do seu papel no sistema. A figura 15 mostra a arquitetura de controle básica aplicada a um inversor operando como fonte de tensão.

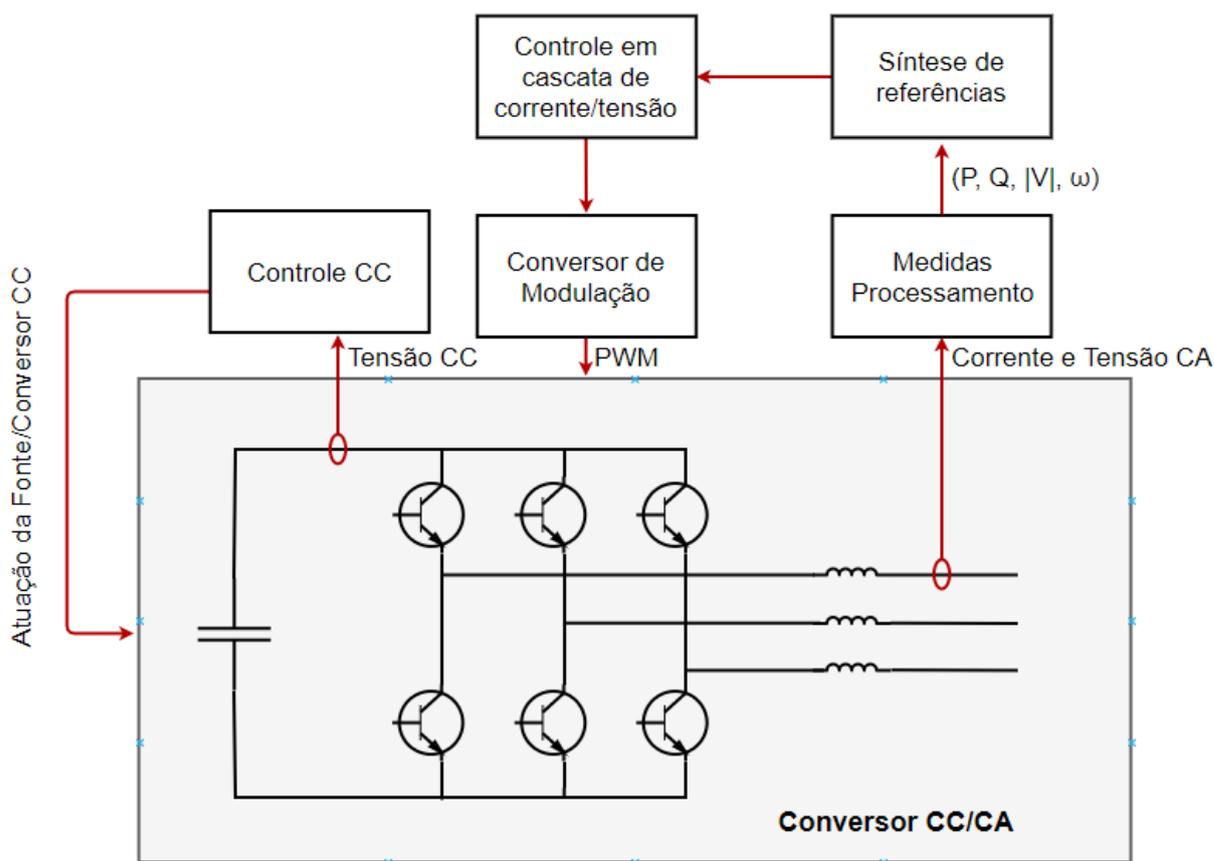


Figura 15 – Malhas de controle aplicada a um conversor de potência. [OS AUTORES, 2019].

Seu loop de controle empenha-se a garantir sua estabilidade de operação. Este consiste em uma cascata PI que controla a corrente através de seu filtro de saída e a tensão sobre o capacitor. O controle PI de corrente, além do controle da corrente de saída do conversor, previne-o de possíveis danos causado por sobrecorrentes. As referências de tensão ou corrente são fornecidas através do bloco de síntese de referência, onde podem ter valores constantes ou calculados. No bloco de processamento e medidas, os sinais de saída são aferidos analogicamente e processados digitalmente, fornecendo os sinais d e q , para controle das três fases de forma integrada, através das transformadas de clark-park. O conversor de modulação transforma os sinais recebidos no plano α e β em pulsos de controle dos semicondutores, gerando, por fim, o sinal de saída. O controle CC é aplicado ao barramento CC de interface para controle deste potencial a um valor mínimo necessário para o correto funcionamento do conversor. O Controle de tensão no barramento CC também possui a finalidade de extrair a máxima energia da fonte através do do Maximum Power Point Tracking (MPPT). O conceito do MPPT é extrair o a máxima energia da fonte.

Em função de sua operação, conversores de potência podem ser classificados em: Alimentadores, Formadores e Suporte, e irão variar de acordo com seu circuito de controle e a forma como obtêm suas referências.

2.3.4.1 ALIMENTADOR DE REDE

Inversores alimentadores possuem como função fornecer energia para uma rede energizada. São representados por uma fonte de corrente em paralelo com uma alta impedância. Um modelo simplificado está representado na Figura 16, onde P^* representa a potência ativa a ser injetada. Essa aplicação demanda sincronização no ponto de acoplamento para regular precisamente a potência fornecida [12]. Esses conversores operam conectados à rede ou em paralelo com outros inversores formadores e alimentadores. As principais fontes de geração distribuída possuem inversores operantes neste modo, como solar ou eólica. Eles fornecem a máxima potência disponível em sua fonte através do Maximum Power Point Traking (MPPT). Caso seu ponto de conexão, ou rede não possuam outros geradores regulando a tensão e frequência, não é possível sua operação pois seu controle é somente efetuado sobre a corrente de saída.

O principal objetivo dos inversores alimentadores de rede é fornecer a máxima energia disponível na fonte à rede.

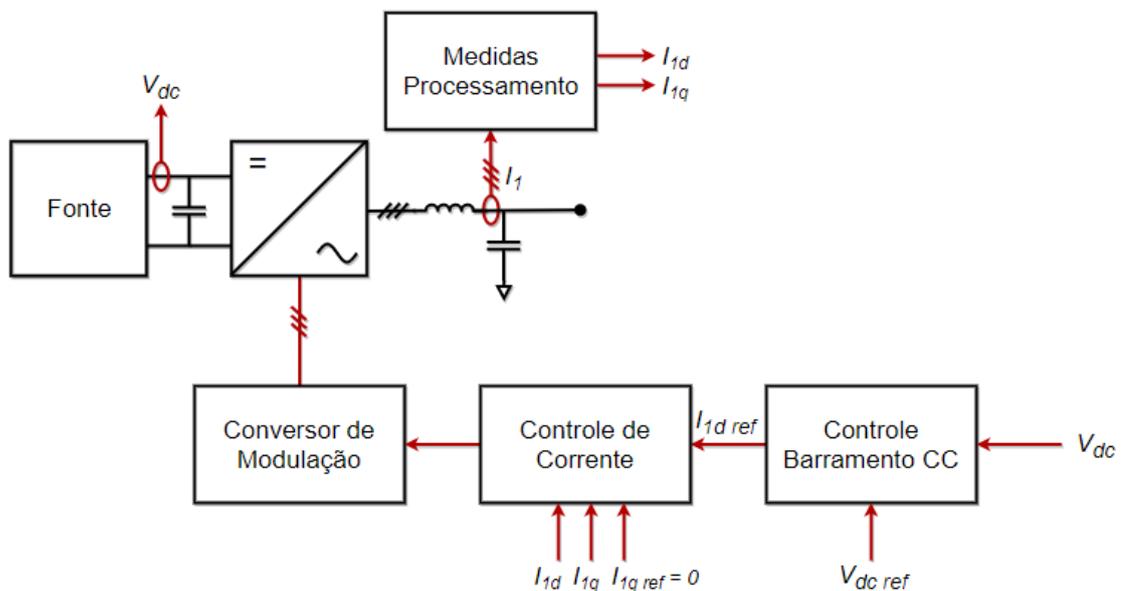


Figura 16 – Blocos de controle de um inversor alimentador [OS AUTORES, 2019].

Os blocos acima representam o controle do inversor alimentador. Toda energia da fonte é fornecida para o capacitor de interface através do conversor CC-CC na entrada do inversor. O conversor CC-CC não leva em consideração a capacidade de carga do capacitor, e sim qual energia é possível extrair da fonte e entregá-la ao capacitor. O controlador do nível de tensão sobre o capacitor de interface define a corrente de saída do inversor, a fim de mantê-lo constante e não sobrecarregá-lo.

O limitador de corrente, após o bloco de controle do nível do barramento CC, garante que o inversor trabalhará em seus níveis nominais, evitando danos. O compensador de corrente PI garante a nulidade do erro da corrente de saída em relação à de referência. A após o compensador, sinais de tensão são fornecidos ao gerador de PWM para que coordene o chaveamento de saída a fim de gerar a corrente desejada. O filtro LC de saída, passa baixa, filtra as componentes de alta frequência gerada durante o chaveamento, fornecendo um sinal com baixa distorção harmônica.

Na figura 17 está representado a malha de controle [14]. Há dois compensadores proporcionais integradores: um para a corrente direta e outra para em quadratura. Após o PI, há o desacoplamento dos sinais d q, evitando interferências de controle entre si. O compensador da tensão do barramento CC define referência para a corrente de saída para manter esta tensão constante. O bloco PLL é necessário para adquirir o ângulo da tensão de rede.

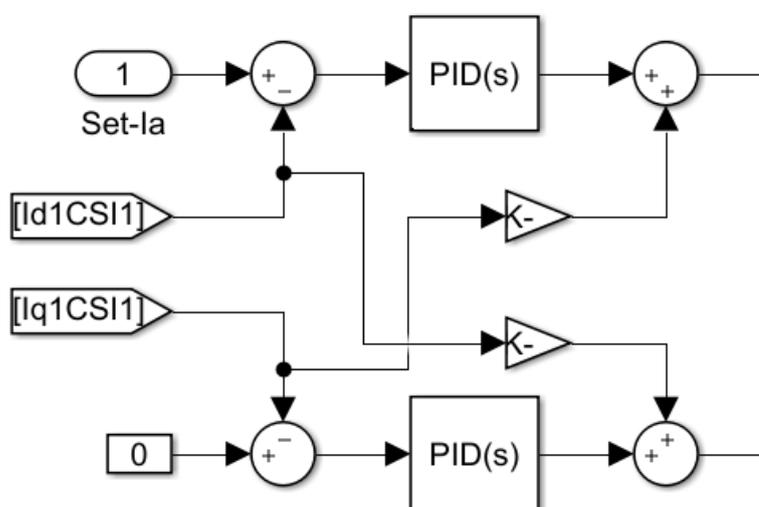


Figura 17 – Blocos de controle de um inversor alimentador[14].

2.3.4.2 ALIMENTADORES COM CONTROLE P Q

Os alimentadores podem possuir controle das potências ativa e reativa de saída, nos casos de suas fontes serem capazes de controlar os valores da tensão do barramento CC. As referências de corrente direta e quadratura são dadas através do bloco de cálculo de potência. Para este cálculo, as potências ativa e reativa devem ser definidas por um agente do sistema. Este controle é aplicado nos casos onde deseja-se controlar e, ou, dividir a geração entre as fontes, sendo útil em aplicações para suporte da rede. Desta forma ele fornece energia de acordo com a demanda da carga, e não em função da geração da sua fonte primária. Este modo é indicado para fontes que podem armazenar energia, e dessa forma regular sua potência de saída.

A topologia de controle deste modo de operação está representada na figura 18. O bloco de controle de tensão do barramento CC é trocado por um bloco de cálculo das correntes de referência em função da potência definida.

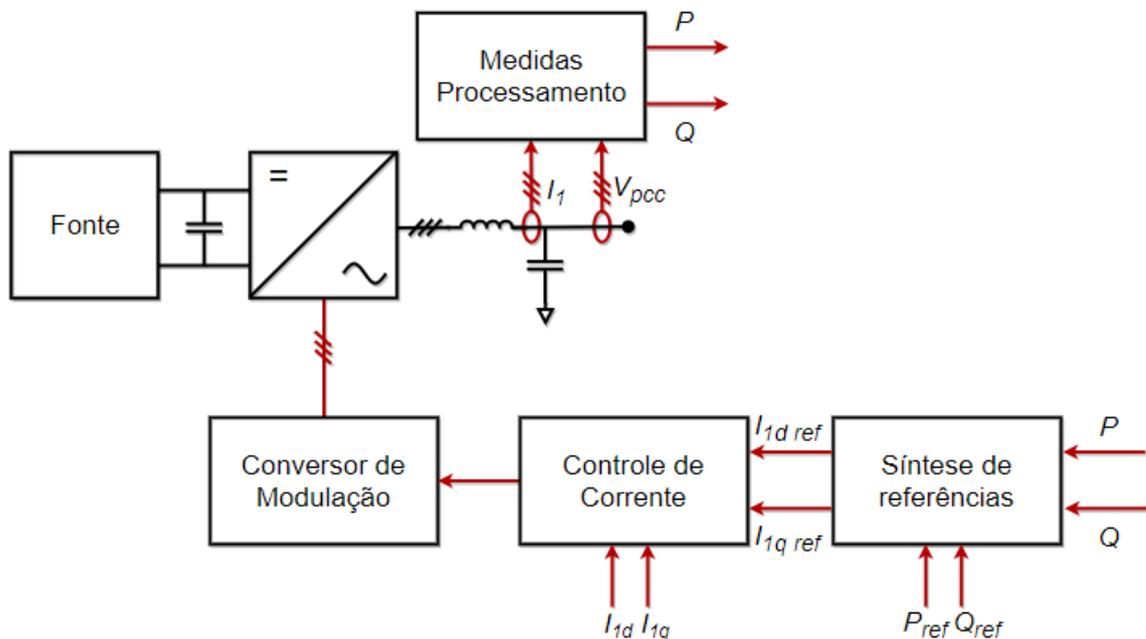


Figura 18 – Topologia de controle do inversor alimentador de rede com controle P Q. [OS AUTORES, 2019].

2.3.4.3 FORMADORES DE REDE

A topologia de um inversor formador de rede está representada na figura 19. Os conversores formadores controlam a amplitude de tensão e frequência da rede local através de malhas de controle adequadas e são representados como uma fonte de tensão ideal, com uma baixa impedância de saída [12]. São necessários para a formação da tensão e frequência de uma rede Off-Grid. Também podem operar em paralelo com outra fonte de tensão formadora, porém necessitam de uma sincronização de tensão muito precisa pois possuem baixa impedância de saída e falhas podem ocorrer devido ao paralelismo fora de fase e, ou com níveis de tensão distintos.

O conversor formador necessita de uma fonte CC de entrada capaz de fornecer toda energia demandada pela carga. Caso essa fonte não a possua, o inversor deverá ser desconectado a fim de evitar danos à fonte CC. Não será considerado esse cenário em nosso trabalho. Caso este conversor seja o único a alimentar o sistema, sua fonte CC deverá ser capaz de fornecer toda energia ativa e reativa para cobrir a carga. O controle da fonte CC deverá, manter o nível de tensão adequado no barramento CC de interface.

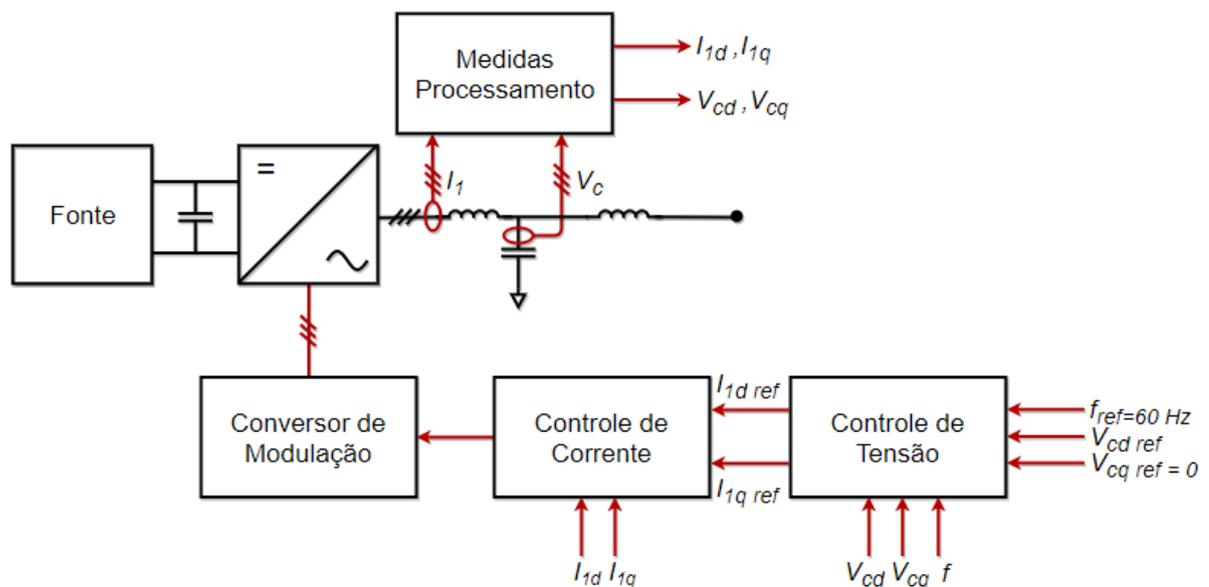


Figura 19 – Topologia de controle do inversor formador de rede. [OS AUTORES, 2019].

A estrutura de controle, representada na figura 21z, contempla o controle PI de tensão e corrente em cascata. O primeiro estágio é o controle integral de tensão, em coordenadas d q, com um proporcional integrador para a tensão direta e outro

para a tensão em quadratura. A referência tensão direta é fixa no valor nominal e a referência de quadratura é zero pois desconsiderou-se as tensões de sequência zero, desta forma este inversor é aplicado à sistemas sem neutro acessível ou equilibrados. A referência de frequência é fixa, assim integrador fornecerá uma variação constante do ângulo para as transformadas e conseqüentemente a frequência do sistema será fixa. Após o controlador PI, o sinal é desacoplado para evitar interferência de controle entre os eixos d e q e conseqüentemente entre as fases.

O segundo estágio é análogo ao primeiro. Possui um controlador PI para a corrente direta e outro controlador PI para controle da corrente em quadratura. Possui, também, o desacoplamento entre as correntes d e q .

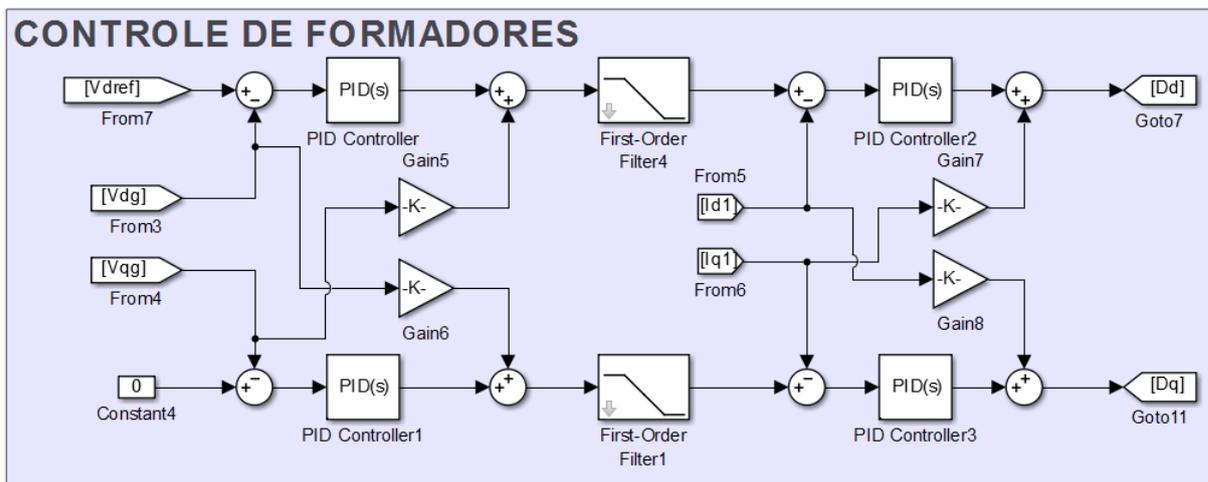


Figura 21 – Estrutura de controle de inversores formadores, sendo a única fonte de tensão do sistema.

2.3.4.4 SUPORTE DE REDE

Inversores de suporte podem operar como fonte tensão (VSI) ou como fonte de corrente (CSI). Para o primeiro caso, sua finalidade é regular os sinais de saída a fim de controlar os valores de tensão e frequência da rede dentro de limites de operação [12]. Suas referências são geradas por um controle que considera os parâmetros da própria rede, como tensão e frequência, ou do próprio conversor, como potência ativa e reativa de saída, a fim de auxiliar na estabilidade do sistema e fazer a divisão de geração. Para essa regulação, os inversores de suporte podem

operar tanto com o fornecimento de energia quanto a absorção, uma vez que são conectados à elementos armazenadores.

O controle Droop, o mesmo aplicado ao controle de geração de máquinas síncronas operando em paralelo, é o proposto atualmente para esta tarefa. Este controle descentralizado permite a divisão de potência entre os inversores sem a aplicação de uma rede de comunicação e um equipamento mestre comandando o processo.

Assim como o formador de rede, o suporte possui os compensadores de tensão e corrente e o gerador de PWM para acionar as chaves do inversor. A distinção entre eles é que para o caso de fonte de tensão o suporte possui o bloco de controle Droop, gerando referências dinâmicas de acordo com os parâmetros da rede, diferente do caso do formador, onde as referências são fixas. As estruturas de controle estão representadas nas imagens 22 e 23.

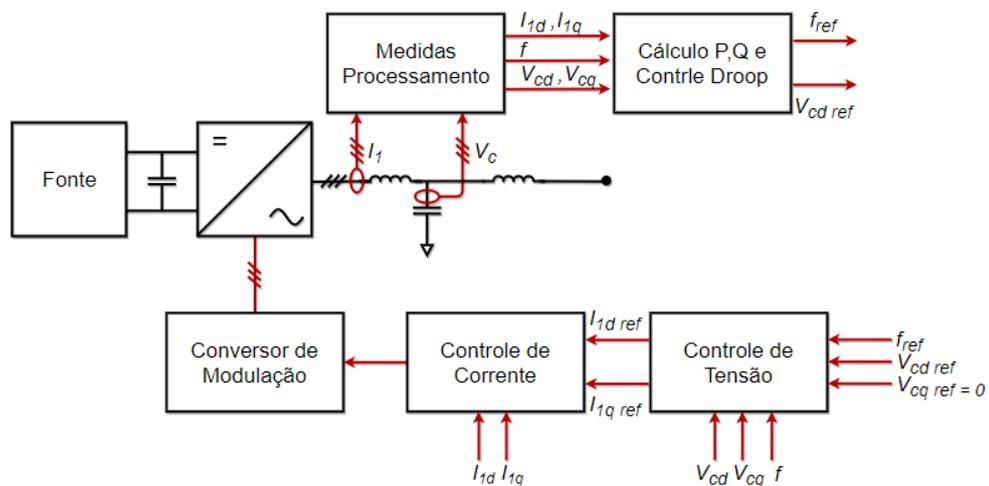


Figura 22 – Topologia de controle do inversor suporte de rede como fonte de tensão.

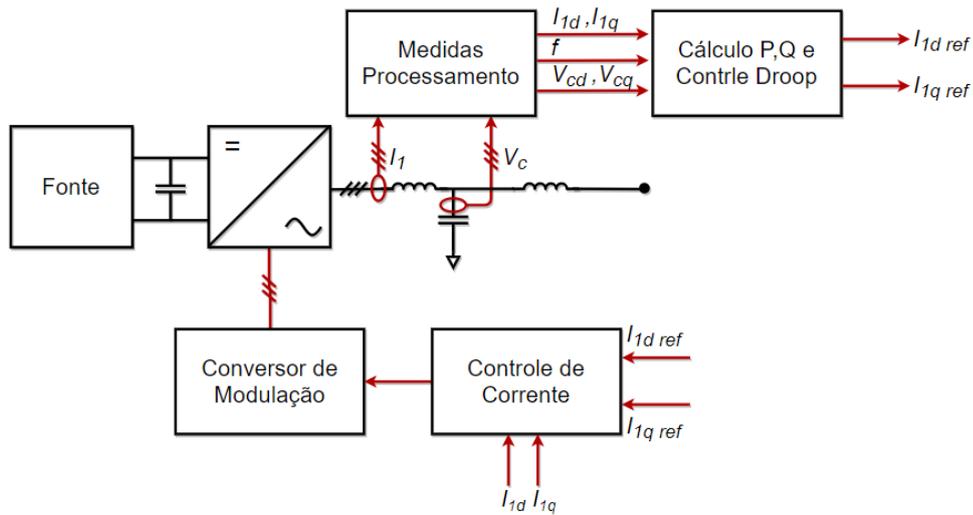


Figura 23 – Topologia de controle do inversor suporte de rede como fonte de corrente.

A curva Droop, representada na figura 6, define a referência de frequência em função da potência ativa de saída, e a referência de tensão em função da potência reativa fornecida para os inversores em modo de fonte de tensão. A topologia do controle Droop aplicados aos conversores de suporte em modo de fonte de tensão está representada na figura 24. A partir dos valores de tensão e corrente de saída, em coordenadas d q, com cálculos baseados em [15], obtém-se os valores instantâneos de potência ativa e reativa de saída. Um filtro passa baixa com frequência de corte em 60 Hz é adicionado em série para garantir estabilidade da operação.

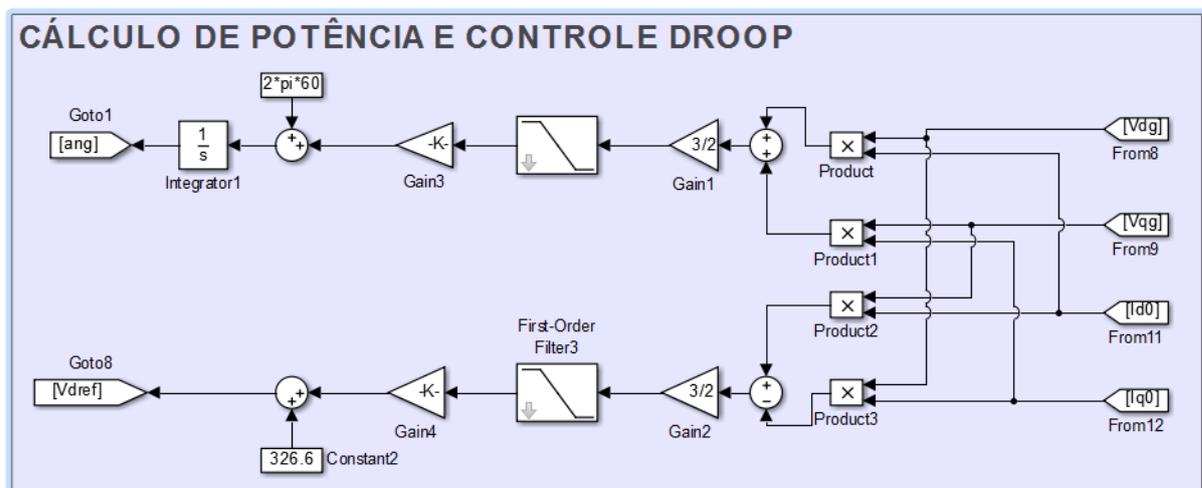


Figura 24 – Topologia de controle Droop aplicado a conversores suporte em modo de fonte de tensão.

Os ganhos K_d e K_q são os coeficientes Droop de potência ativa e reativa respectivamente. O ajuste do controle Droop entre as fontes de uma mesma Microrrede pode ser definido pelo ganho K mostrado na figura IFS04. Esse ganho é calculado de acordo com o coeficiente da reta que define o controle Droop, podendo ser conferido na Figura IFS03. Assim, segue a fórmula para o cálculo desse ganho para a geração de referência de potência ativa:

$$K_d = \frac{\Delta\omega}{P_{max}} \quad (2.4.1)$$

Sendo:

$\Delta\omega$ – Variação máxima de frequência aceita pela Microrrede;

P_{max} – Potência ativa máxima entregue pelo inversor de frequência.

Da mesma forma, segue fórmula do cálculo do ganho para a geração de referência de potência reativa:

$$K_q = \frac{\Delta V}{Q_{max}} \quad (2.4.2)$$

Sendo:

ΔV - Variação máxima de tensão aceita pela Microrrede;

Q_{max} – Potência reativa máxima entregue pelo inversor de frequência.

O sinal é comparado com o valor de referência V_0 , para a potência reativa, e ω_0 , para a potência ativa. A referência de frequência definida passa pelo integrador, resultando no ângulo, este atribuído a todos os blocos de transformadas de Clark e Park, definindo a frequência e nível de tensão de saída do inversor. Já o sinal de referência de tensão (ou corrente para o caso de inversores dotados apenas de controle de corrente) irá para o comparador de sinal anterior aos compensadores, para serem comparados aos sinais de saída medidos.

O cálculo das potências instantâneas utilizada para a aquisição da referência de tensão segue nas equações 2.4.3 e 2.4.4:

$$P = v_d i_d + v_q i_q \quad (2.4.3)$$

$$Q = v_d i_q - v_q i_d \quad (2.4.4)$$

Para o caso do Droop utilizado em inversores com controle de tensão, o cálculo das tensões de referência é simples, uma vez que a referência de tensão em

quadratura (V_q) sempre será igual a 0 e a de tensão direta (V_d) será igual ao sinal gerado pelo cálculo e controle Droop.

Para o caso em modo de fonte de corrente, o controle Droop definirá a potência ativa de saída em função da frequência, e reativa de saída, em função da tensão do ponto de conexão do inversor. A figura IFS05 mostra a malha de controle do inversor CSI. Assim, se faz necessário um cálculo do sinal de referência e por isso ele passa a ser mais complexo. Ele é preciso uma vez que são gerados sinais de potência pelo controle Droop. Com a utilização dos sinais de tensão medidos na saída do inversor, seguem, nas equações 2.4.3 e 2.4.4. os cálculos realizados na saída do controle Droop:

$$i_{dref} = \frac{v_d \cdot P + v_q \cdot Q}{(v_d^2 + v_q^2)} \quad (2.4.3)$$

$$i_{qref} = \frac{v_q \cdot P + v_d \cdot Q}{(v_d^2 + v_q^2)} \quad (2.4.4)$$

Sendo:

v_d – Tensão direta medida na saída do inversor de frequência;

v_q – Tensão em quadratura medida na saída do inversor de frequência;

P – Sinal de potência ativa gerado pelo controle Droop;

Q – Sinal de potência reativa gerado pelo controle Droop.

A malha de controle responsável pelo controle Droop para gerar a referência de Potência ao cálculo de referência de corrente se encontra na Figura 25.

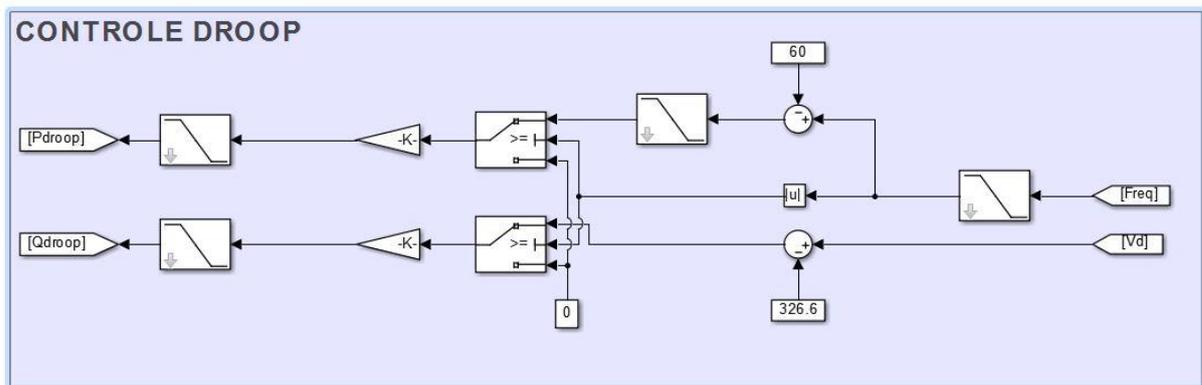


Figura 25 – Controle Droop aplicado aos CSIs. [OS AUTORES, 2019].

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Com a maior utilização de fontes distribuídas, tem crescido também o número de publicações relacionadas à utilização de Microrredes como forma de mitigar os defeitos ocasionados pela injeção direta de potência no sistema de distribuição, e diminuir a ocorrência de falhas no fornecimento de energia elétrica. Dessa forma, foi feito um levantamento das produções e publicações de artigos e dissertações mais relevantes para o nosso trabalho.

Através de um manual de técnicas de modelagem e técnicas de controle [GKOUNTARAS, 2017], foi possível projetar e modelar a filtragem de saída de cada inversor presente na Microrrede, de forma que todas as fontes entreguem um sinal adequado para a manutenção do fornecimento de energia. É através do filtro que é feito a medição do sinal de saída para que seja feita a compensação do mesmo.

Um importante trabalho para a compreensão dos modos de operação dos Inversores de Potência foi o apresentado por [ROCABERT, 2012]. Ele apresenta novos métodos de controle em diferentes níveis hierárquicos. Primeiramente, internos aos inversores de potência, até formas de controle centralizado capazes de sincronizá-los.

Um exemplo de Microrrede foi o simulado por [WU, 2014] em um artigo focado na apresentação de um modelo de Microrrede que se utiliza de um único inversor formador, operando como fonte de tensão e, de forma oposta, mais dois inversores alimentadores, operando como fonte de corrente. Através desse estudo pudemos adquirir importantes noções sobre o funcionamento do controle Droop aplicado à inversores de frequência presente nas Microrredes, uma vez que ficou explicitado nas simulações apresentadas no artigo o dinamismo entre as fontes que esse circuito de controle acrescenta. A figura 26 apresenta a compensação e divisão exata de carga entre os 3 geradores conectados na Microrrede, aliado a maior aproximação do nível de referência de frequência, nesse exemplo.

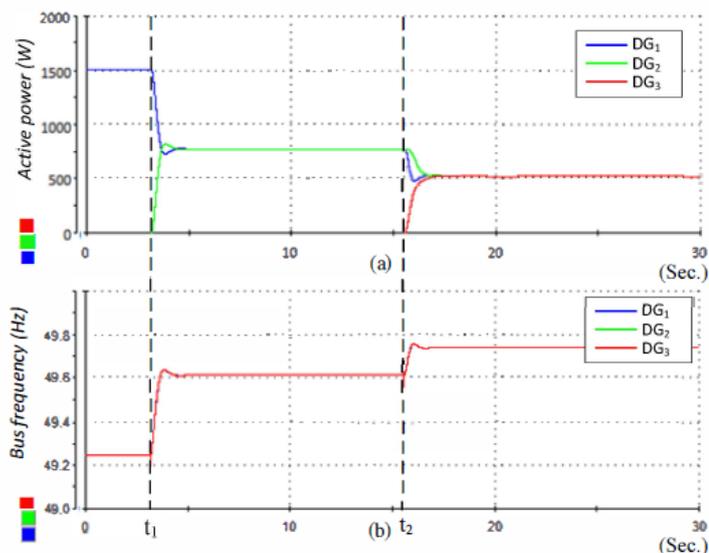


Figura 26 – Comportamento do Controle Droop aplicado à inversores de potência. Divisão de Cargas(a) e sincronia(b) evidenciadas. [WU,2016].

Em [MICALLEF, 2012] foi feito um estudo de divisão de cargas em uma Microrrede ilhada de baixa tensão. O objetivo foi simular duas situações, a primeira em uma Microrrede ideal, onde não se leva em consideração as quedas de tensão causadas pelas diferentes impedâncias das conexões e cabeamentos. Na segunda, são consideradas essas diferenças, causando desigualdades no fornecimento de potência reativa pelos geradores distribuídos da Microrrede, como fica evidenciado na figura 27.

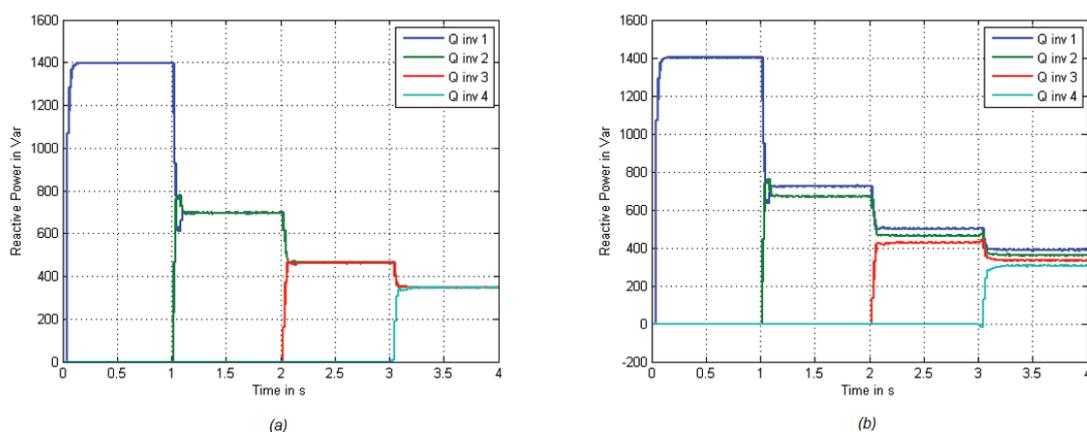


Figura 27 – Diferença de fornecimento de potências reativas dos geradores da Microrrede, pela consideração (b) ou não (a) das impedâncias das linhas de distribuição. [MICALLEF, 2012].

Outra importante contribuição para a compreensão do funcionamento da operação de Microrredes dotadas de circuitos de controle descentralizado foi o artigo publicado por [MOHAMMAD, 2015]. Através da aplicação do controle à inversores

operando como fonte de corrente, e um método de aquisição de referência de corrente de dois níveis em cascata, foi possível observar melhoras no balanceamento dos geradores. O circuito de controle pode ser visto na figura RB06.

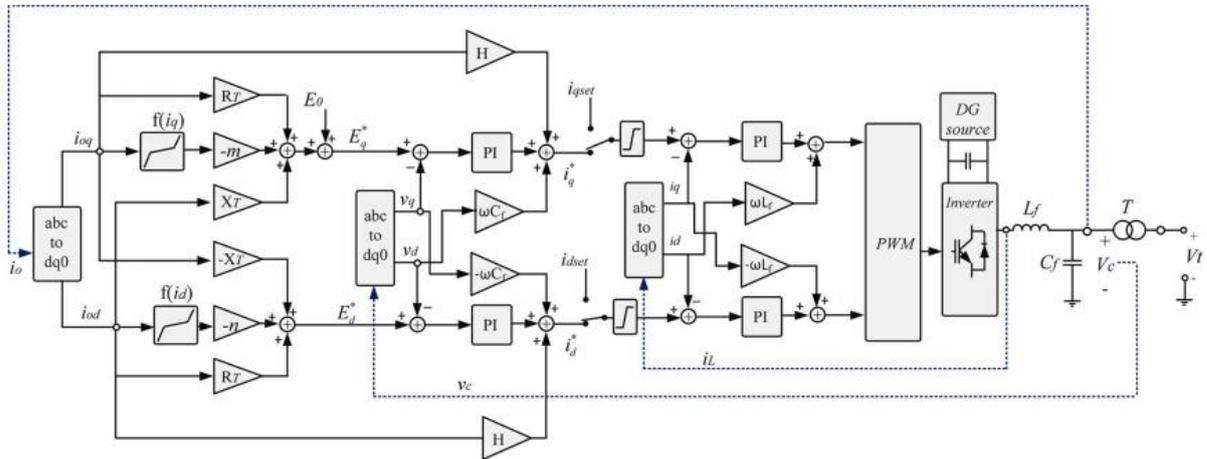


Figura 27 – Controle proposto para aumentar o compartilhamento de potência na Microrrede. [MOHAMMAD, 2015].

O método de controle utiliza como base para a geração de referência as variáveis retangulares, ou i_d , i_q , V_d e V_q , ao invés de calcular as potências de saída P e Q. Além disso, adiciona novos coeficientes ao cálculo da referência para o compensador de tensão, fazendo com que a curva de Droop deixe de ser linear, e acrescente um dinamismo diferenciado ao sistema. Como resultado, podemos conferir as figuras 28 e 29 deixando claro a diferença da aplicação de um controle Droop comum e o Droop proposto em seu trabalho.

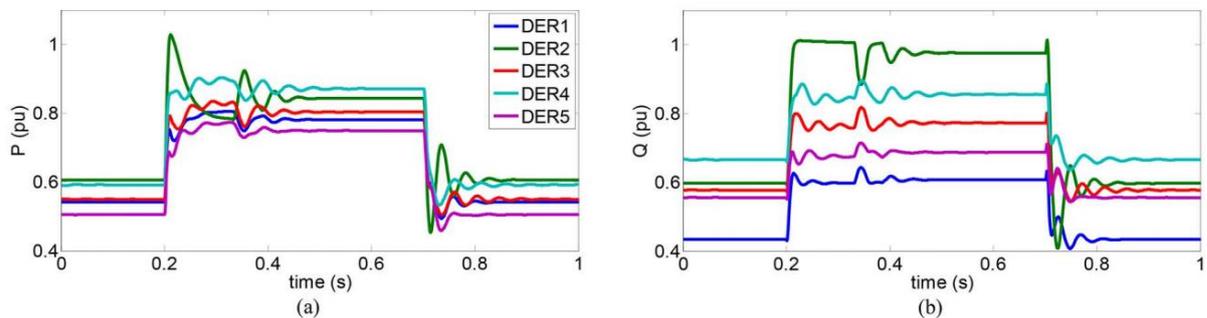


Figura 28 – Diferença de fornecimento de potência ativa (a) e reativa (b) entre os geradores presentes na Microrrede. [MOHAMMAD, 2015].

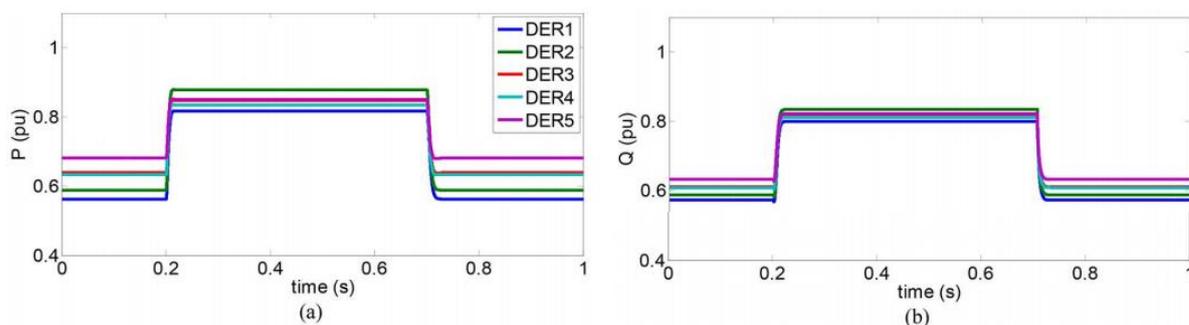


Figura 29 – Divisão equilibrada de potência ativa (a) e reativa (b) através da utilização do controle Droop proposto pelo autor. [MOHAMMAD, 2015].

Através dessa proposição, além do balanceamento entre as unidades geradoras, foi possível uma resposta do degrau de carga mais rápida e estável, adicionando confiança e robustez ao sistema da Microrrede.

A seguir, mostraremos as simulações desenvolvidas pela equipe com base na fundamentação teórica feita anteriormente e o levantamento de publicações realizado neste capítulo.

4 MODELAGEM SIMULINK

Para a análise da operação de fontes em paralelo, formando uma microrrede ilhada, e a divisão de carga entre elas, utilizamos o Simulink. Este software, uma extensão do Matlab, é utilizado com a finalidade de criar ambientes para modelagem, simulação e análise de sistemas dinâmicos.

O Sistema será constituído por três cargas e duas fontes conforme a Figura 30:

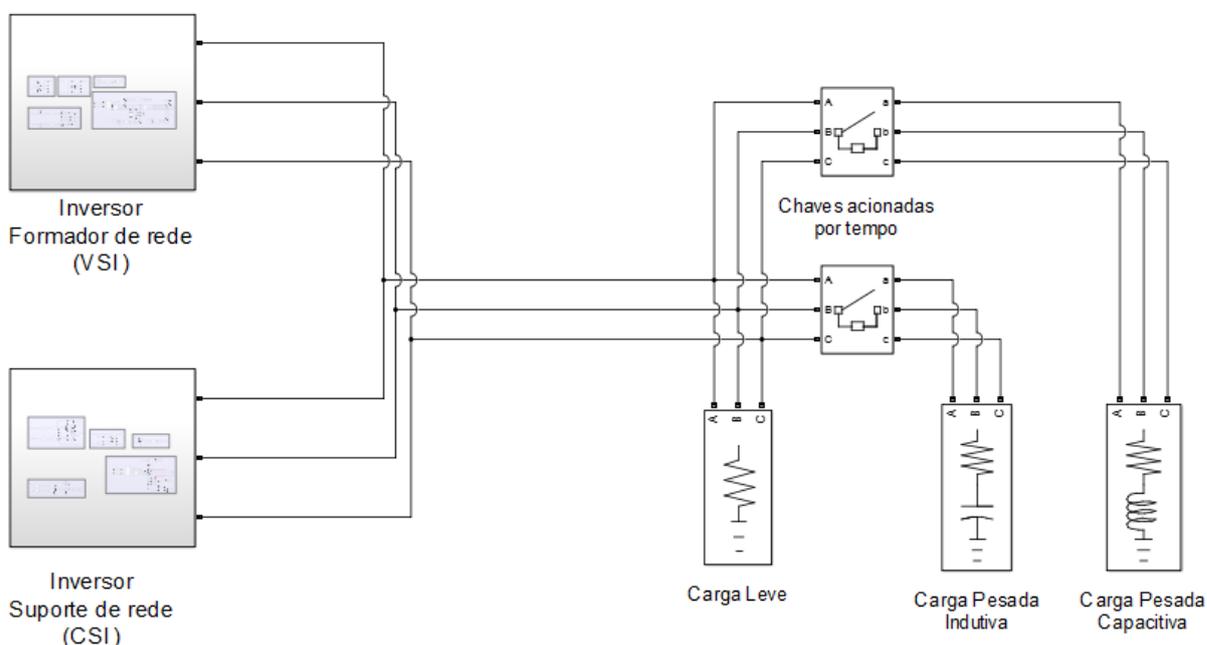


Figura 30 – Circuito de simulação. [OS AUTORES, 2019]

Dois conversores de potência serão responsáveis pela alimentação da rede. O primeiro conversor, suporte de rede com controle Droop, está em modo fonte de tensão. O segundo conversor, é um alimentador de rede com controle controle P Q, em modo de fonte de orren controle P Q, e e para definição destas referências, aplica-se o controle Droop, opera como fonte de corrente. Ambas as fontes, possuem uma fonte de tensão constante em sua entrada, representando um barramento CC.

O barramento CC pode fornecer e receber energia permitindo que os conversores possuam fluxo bidirecional. O nível de tensão contínuo será desconsiderado no presente trabalho, pois nosso foco é analisar somente o lado CA.

O limite de fornecimento de energia do barramento CC também foi desconsiderado, assim essa limitação não influenciará a resposta do lado CA.

Duas cargas em paralelo serão aplicadas ao sistema. No instante inicial, uma estará conectada durante a energização da microrrede. Uma nova carga será inserida no sistema a fim de gerar um degrau de potência. Após este, a eficácia do controle droop para divisão de carga poderá ser analisada.

Na tabela 1 são listados os parâmetros básicos da microrrede. Eles foram baseados nos equipamentos a serem instalados no Departamento de Engenharia Elétrica, DELT, da Universidade Federal do Paraná.

Tabela 1 – Valores Nominais de operação da Microrrede [OS AUTORES, 2019].

Parâmetro	Valor
Tensão RMS Nominal (V)	400
Frequência Nominal (Hz)	60

4.1 CARGAS

As cargas representam uma entrada abrupta no sistema. Seus valores seguem na tabela 2. Elas serão predominantemente indutivas ou capacitivas. Os valores utilizados são arbitrários.

Tabela 2 – Quantificação da variação de cargas nas simulações das Microrredes. [OS AUTORES, 2019].

	Leve	Média
R (kW)	5	15
L (kVAr)	5	10
C (kVAr)	5	10

4.2 INVERSOR SUPORTE COM CONTROLE DROOP

O Inversor suporte opera como fonte de tensão e será responsável pela geração da tensão e frequência da Microgrid através das referências de seu controle

Droop. Parâmetros projetados, também, com base na potência dos conversores CC/CA que serão instalados no DELT.

Segue, na figura ilustrativa com o circuito do inversor suporte como fonte de tensão, concebido no Simulink.

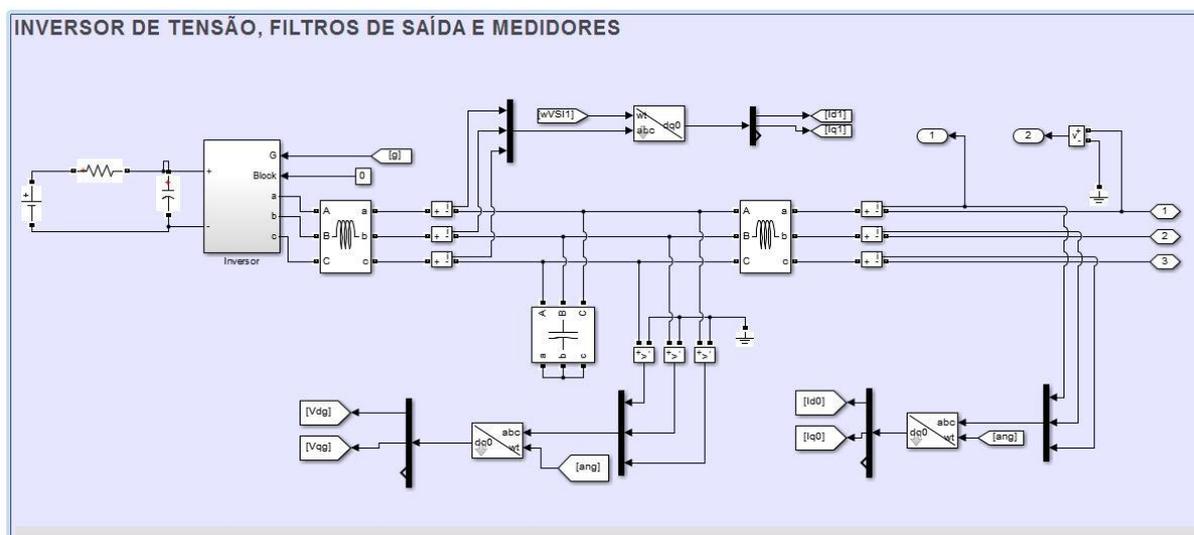


Figura 31 – Inversor CC/CA formador de rede como fonte de tensão, [OS AUTORES, 2019].

Seus parâmetros estão dispostos na Tabela 03. O filtro de saída LCL foi projetado para uma corrente de 43,3 A (valor nominal) e ripple de 5%. O conversor de referência para esse cálculo possui 30 kVA (@400V).

Tabela 3 – Valores do filtro utilizado na conexão do inversor suporte de rede operando como fonte de tensão [OS AUTORES, 2019].

Tipo	Valores
Lf (mH)	6
C (uF)	10
L0 (mH)	0,1
Vca rms(V)	400

Vcc (V)	750
---------	-----

Os ganhos dos controladores PI, dispostos na Tabela 04 para o compensador de corrente e Tabela 5, para o compensador de tensão, foram parametrizados de forma manual, a partir do modelo de compensação apresentado em [AA16], em testes no Simulink com valores nominais de operação.

Tabela 4 – Valores dos ganhos do compensador de corrente. [OS AUTORES, 2019].

Ganho	Valor
Proporcional	0.2
Integral	50

Tabela 5 – Valores dos ganhos do compensador de tensão. [OS AUTORES, 2019].

Ganho	Valor
Proporcional	0.2
Integral	80

Os parâmetros de controle Droop para frequência (ganho direto) e tensão (ganho em quadratura), presentes na Tabela 6, foram calculados através das equações 2.4.1 e 2.4.2.

Tabela 6 – Valores dos parâmetros das curvas de controle Droop. [OS AUTORES, 2019].

Coefficiente	Valor
Desvio Máximo de	0.1

Frequência (Hz)	
Desvio Máximo de Tensão de Fase (Vrms)	23,09
Variação máxima de potência ativa (kW)	30
Variação máxima de potência reativa (kVAr)	30
Ganho Direto (Hz/kW)	0,003333
Ganho em Quadratura (kVAr/V)	0,769666

4.3 INVERSOR ALIMENTADOR COM CONTROLE P-Q E CONTROLE DROOP

O circuito do segundo inversor, alimentador com controle P-Q definidos pelo droop, Simulink conforme a Figura 32. Este inversor irá fornecer potência ativa e reativa de acordo com os níveis de frequência e tensão, respectivamente, a fim de auxiliar no fornecimento de energia para as cargas. Seus parâmetros serão os mesmos do formador da rede por se tratar de um equipamento com a mesma potência nominal.

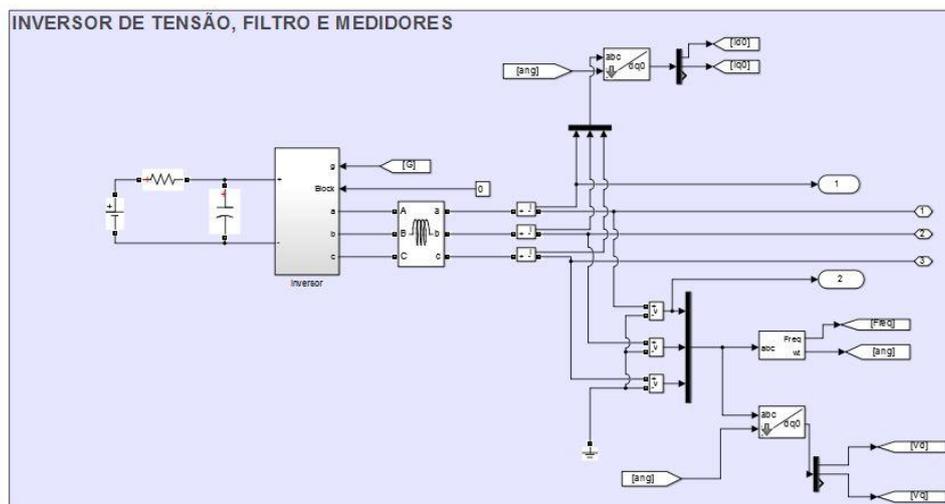


Figura 32 – Inversor CC/CA formador de rede como fonte de tensão, [OS AUTORES, 2019].

Seus parâmetros estão dispostos na Tabela 07. O filtro de saída L foi projetado para uma corrente de 43,3 A (valor nominal) e ripple de 5%. Sua potência nominal foi definida com a mesma referência do inversor suporte de rede, 30 kVA (@400V). Possui somente um filtro L na saída pois a corrente sobre este é a única variável necessária para o controle das potências ativa e reativa de saída.

Tabela 7 – Valores do filtro utilizado na conexão do inversor alimentador de rede operando com controle P-Q e Droop. [OS AUTORES, 2019].

Tipo	Valores
Lf (mH)	6
Vca rms(V)	400
Vcc (V)	750

Os ganhos dos controladores PI, dispostos na Tabela 08 para o compensador de corrente, foram parametrizados de forma análoga ao inversor suporte, ou seja, de forma manual com base no circuito proposto em [AA16], em testes no Simulink e com valores nominais de operação. Verificou-se que os parâmetros utilizados no inversor suporte fornecem bom desempenho no controle das referências de corrente fornecidas pelo droop.

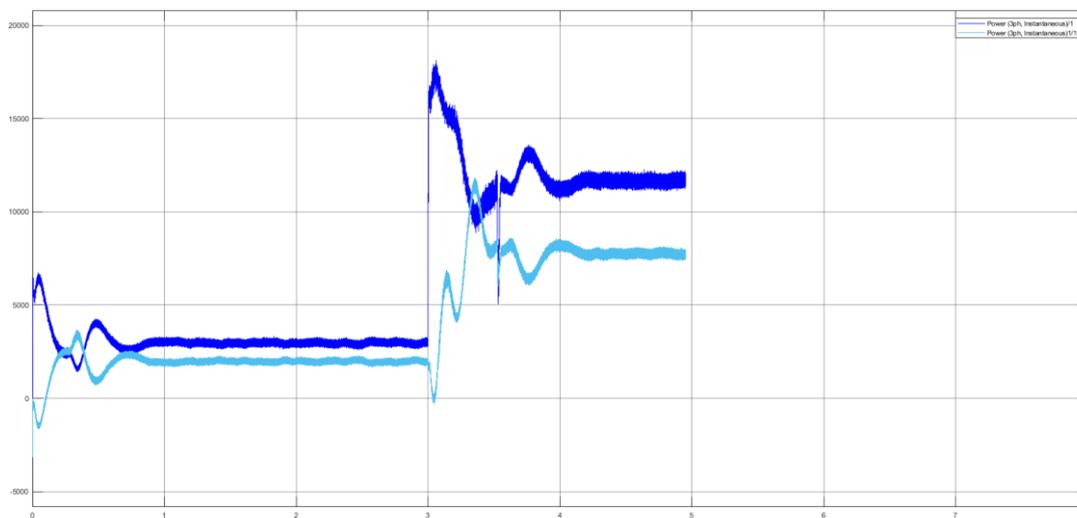
Tabela 8 – Valores dos ganhos do compensador de corrente. [OS AUTORES, 2019].

Ganho	Valor
Proporcional	
Integral	

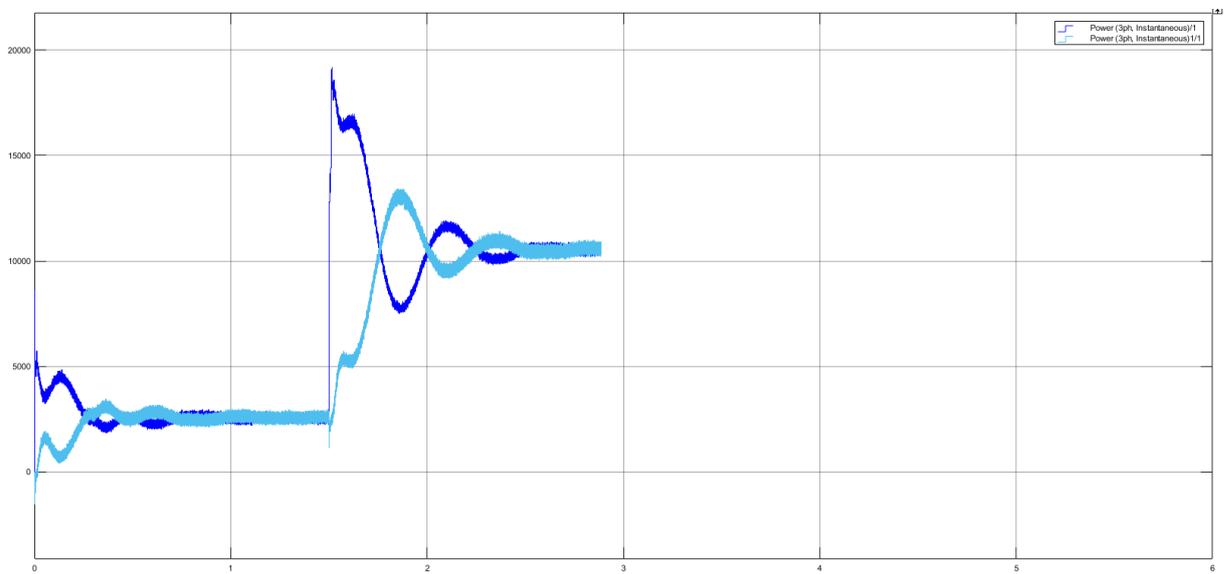
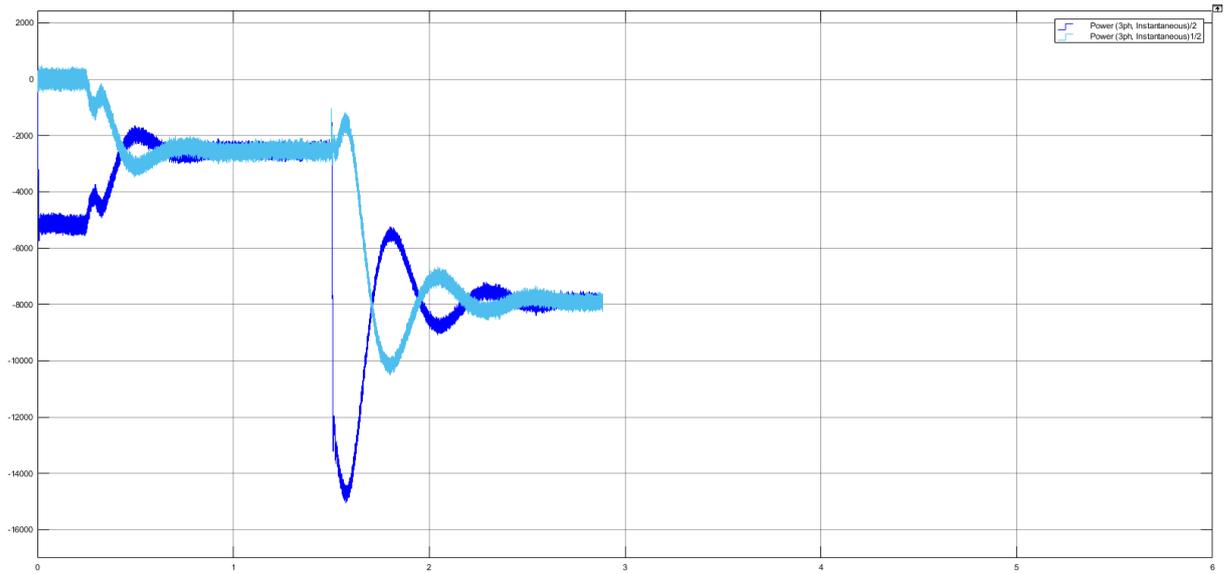
5 RESULTADOS

Nos cenários apontados acima, obtivemos os seguintes resultados para as simulações no Simluiuink.

5.1 CASO I



6 CASO II



6.1 CASO III

7 CONCLUSÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

8 REFERÊNCIAS

ANEEL. **Atualização das projeções de consumidores residenciais e comerciais com microgeração solar e fotovoltaicos no horizonte 2017-2024.**

ANEEL. [S.l.], p. 26. 2017. (NT nº0056/2017-SRD/ANEEL).

ANTUNES, H. M. A.; SILVA, S. M. Conexão de um Filtro Híbrido Série em uma Microrrede para Compensação Harmônica. **Research Gate**, Belo Horizonte, 20 January 2018. 1-6.

EATON, 2016. Disponível em: <<https://www.eaton.com/FTC/utilities/MicrogridEnergySystems/index.htm>>. Acesso em: 15 nov. 2019.

LEONARDO, R. **Modelagem, Análise de Estabilidade e Controle de Microrredes de Energia Elétrica.** [S.l.].

LUKASIEVICZ, T. **Controle de uma microrrede ilhada em geração eólica-diesel com alto nível de inserção de geração eólica.** UTFPR. Pato Branco, p. 164. 2016.

MOTA, V. A. D. S. **A energia solar fotovoltaica distribuída como alternativa para a crise energética nacional: modelo de expansão acelerada através de subsídios economicamente justificados.** Universidade de Brasília. Brasília, p. 175. 2015. (xviii).

REN21. **Renewables 2017 - Global Status Report.** REN 21. [S.l.], p. 302. 2017.