

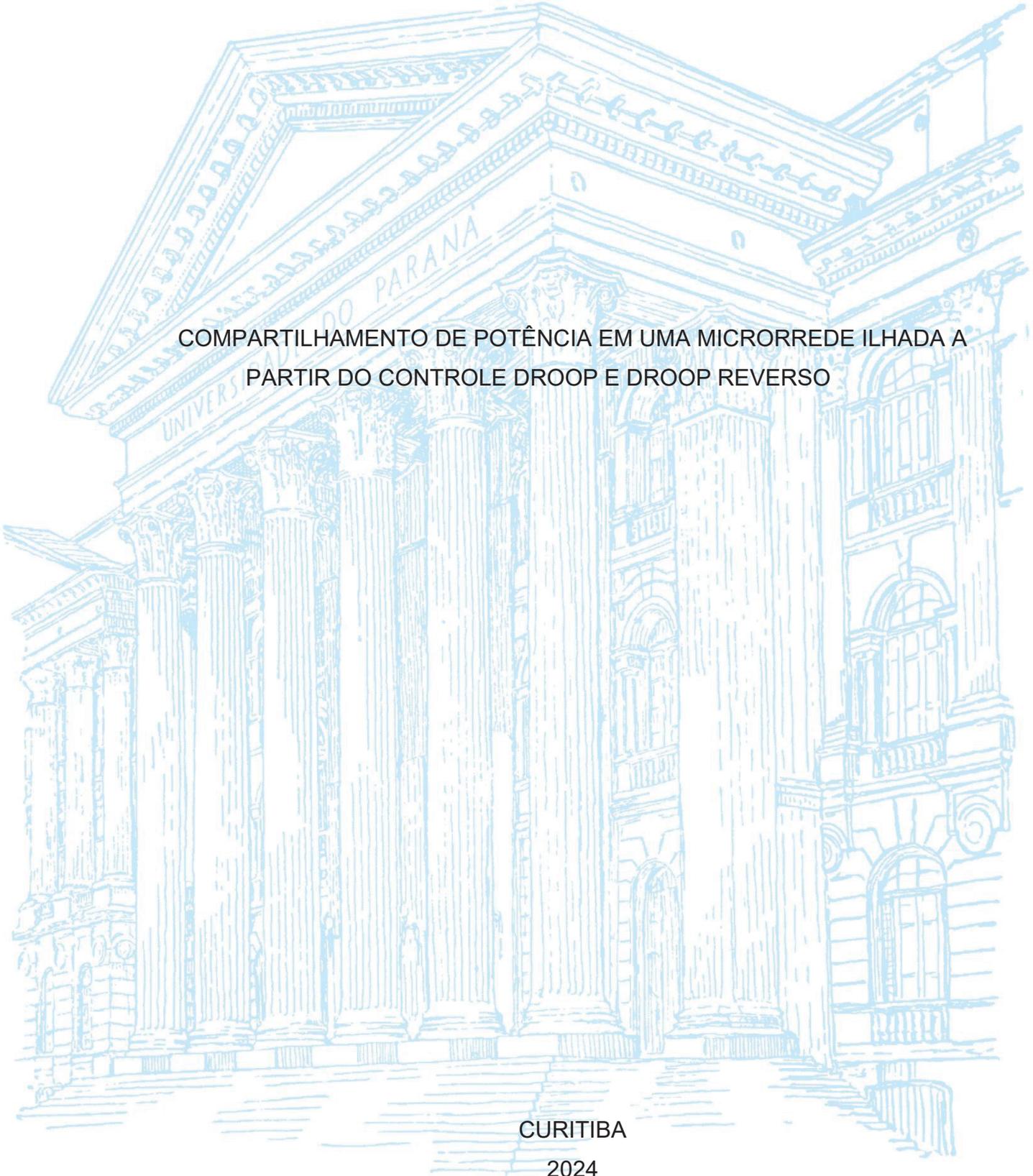
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ABDURAMANE DOS SANTOS BALDÉ

COMPARTILHAMENTO DE POTÊNCIA EM UMA MICRORREDE ILHADA A
PARTIR DO CONTROLE DROOP E DROOP REVERSO

CURITIBA

2024



ABDURAMANE DOS SANTOS BALDÉ

COMPARTILHAMENTO DE POTÊNCIA EM UMA MICRORREDE ILHADA A
PARTIR DO CONTROLE DROOP E DROOP REVERSO

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Setor de tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. João Américo Vilela Junior

CURITIBA

2024

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Baldé, Abduramane dos Santos
Abduramane / Abduramane dos Santos Baldé. – Curitiba, 2024.
1 recurso on-line : PDF.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de
Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

Orientador: João Américo Vilela Junior

1. Microrredes (Redes elétricas inteligentes). 2. Medidores de tensão. 3.
Controle droop. I. Universidade Federal do Paraná. II. Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Elétrica. III. Vilela Junior, João Américo. IV.
Título.

Bibliotecário: Elias Barbosa da Silva CRB-9/1894

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA ELÉTRICA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **ABDURAMANE DOS SANTOS BALDÉ** intitulada: **COMPARTILHAMENTO DE POTÊNCIA EM UMA MICRORREDE ILHADA A PARTIR DO CONTROLE DROOP E DROOP REVERSO**, sob orientação do Prof. Dr. JOAO AMERICO VILELA JUNIOR, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 05 de Agosto de 2024.

Assinatura Eletrônica

08/08/2024 14:08:44.0

JOAO AMERICO VILELA JUNIOR

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

09/08/2024 08:54:33.0

ALEXANDRE RASI AOKI

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

09/08/2024 16:51:35.0

ROGER GULES

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

08/08/2024 12:21:34.0

ROMAN KUIAVA

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Dedico este trabalho à minha família, pelo apoio incondicional que me deram ao longo desta jornada, e a todos os meus professores e mentores, cuja sabedoria e orientação foram fundamentais para meu crescimento acadêmico.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus, pela dádiva da vida e por me permitir realizar tantos sonhos nesta existência.

Agradeço ao meu orientador, Professor Doutor João Américo Vilela Junior, por toda a paciência, pela confiança no meu trabalho e nas minhas ideias, pela disposição, pelos conselhos e pelos ensinamentos.

Agradeço à Coordenação de aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) por apoiar e financiar a realização deste trabalho (Código de Financiamento 001).

Agradeço a todos os meus colegas do Mestrado em Engenharia Elétrica, cujo apoio e amizade estiveram presentes em todos os momentos.

Agradeço aos meus pais, Cherno Abdulai Baldé e Geralda Santos Rocha, por todo apoio, confiança e incentivo que sempre me deram em meus estudos e na minha formação.

Agradeço aos meus irmãos Yussuf dos Santos Baldé, Domingos dos Santos Baldé, Luís dos Santos Baldé, pela amizade e pelo apoio.

Agradeço a toda a minha família, a todos os meus professores, e a todos os meus amigos que, de alguma forma, contribuíram para meu desenvolvimento acadêmico e pessoal.

A educação é o passaporte para o futuro, pois o amanhã pertence àqueles que se preparam hoje (Malcolm X).

RESUMO

Microrredes são aglomerados de fontes de geração distribuída, cargas e sistemas de armazenamento de energia que operam como um único sistema controlável, fornecendo energia para os consumidores locais. São capazes de operar de forma ilhada ou conectadas a uma rede de distribuição. Na sua operação ilhada, a microrrede é responsável não apenas pela regulação da sua tensão e frequência, mas também pelo compartilhamento de potência entre os diferentes recursos energéticos distribuídos disponíveis. O presente trabalho propõe analisar o compartilhamento de potência entre inversores de tensão (*voltage source inverters* - VSIs) em uma microrrede ilhada, a partir de métodos de controle descentralizado (métodos baseados no controle droop), considerando diferentes modos de operação dos inversores. Foi realizada uma análise comparativa de duas arquiteturas de controle, levando em consideração o desempenho no compartilhamento de potência e a capacidade de regulação da frequência e tensão. A primeira arquitetura consiste no paralelismo de dois VSIs operando no modo tensão (*voltage-controlled voltage source inverter* - VCVSI), utilizando o controle droop para o compartilhamento de potência. Na segunda configuração, um dos VSIs opera como um VCVSI, enquanto o outro é controlado no modo corrente (*current-controlled voltage source inverter* - CCVSI). Nesse arranjo, foram utilizados os métodos de controle droop e controle droop reverso, responsáveis pelo compartilhamento de potência entre os dois. Em ambas as configurações, o controle foi implementado sem comunicação entre os inversores. O comissionamento e o controle das microrredes foi realizado a partir de um controlador lógico programável (CLP). A microrrede em estudo é uma instalação física montada no laboratório de microrredes do Departamento de Engenharia Elétrica (DELT) da Universidade Federal do Paraná. Os resultados experimentais mostraram que, no paralelismo entre dois VCVSIs, a microrrede ilhada opera de forma estável, com a tensão e frequência variando dentro dos limites do controle droop. Os dois VSIs foram capazes de compartilhar a potência, com cada um recebendo ou fornecendo uma potência proporcional ao percentual do coeficiente droop configurado. Na configuração que envolve VCVSI em paralelo com CCVSI, o CCVSI foi projetado para ter uma resposta mais lenta em comparação ao VCVSI durante variações de potência. Nos estados estacionários, o compartilhamento de potência teve um desempenho semelhante ao da configuração com dois VCVSIs. No entanto, durante os transitórios, a configuração com dois VCVSIs apresenta a vantagem de não ter o atraso de um dos inversores na resposta à entrada ou saída de carga.

Palavras-chave: Microrredes ilhadas; Controle droop; Inversor de tensão controlado por corrente; Inversor de tensão controlado por tensão.

ABSTRACT

Microgrids are clusters of distributed generation sources, loads, and energy storage systems operating as a single controllable system, providing energy to local consumers. They can operate in island mode or connected to the grid. In island mode, the microgrid is responsible for regulating both its voltage and frequency, as well as managing power sharing among the various distributed energy resources available. This study proposes to analyze the power sharing among voltage source inverters (VSIs) in an islanded microgrid using decentralized control methods (droop-based methods), considering different operating modes of the inverters. A comparative analysis of two control architectures was conducted, taking into account the performance in power sharing as well as the capability to regulate frequency and voltage. In the first architecture, power sharing between two voltage-controlled voltage source inverters (VCVSI) was examined using the droop control method. In the second configuration, one inverter operates as a VCVSI while the other functions as a current-controlled voltage source inverter (CCVSI). This configuration employs both droop control and reverse droop control for power sharing. In both configurations, the control was implemented without the use of communication between the inverters. The commissioning and control of the microgrids was carried out using a programmable logic controller (PLC). The microgrid under study is a physical installation set up in the microgrid laboratory of the Electrical Engineering Department (DELTA) at the Federal University of Paraná. The experimental results showed that, for power sharing between the two VCVSIs, the islanded microgrid operates stably, with voltage and frequency variations remaining within the limits set by the droop control. Each inverter received power proportional to its configured droop coefficient. In the configuration involving a VCVSI in parallel with a CCVSI, the CCVSI was designed to have a slower response compared to the VCVSI during power variations. In steady-state conditions, the power sharing demonstrated a performance similar to that of the configuration with two VCVSIs. However, during transients, the configuration with two VCVSIs has the advantage of not experiencing the delay of one of the inverters in response to load changes.

Keywords: Islanded microgrids; Loss of control; Voltage-controlled voltage source inverter; Current-controlled Voltage source inverter.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – PROCESSO DE SELEÇÃO DOS ARTIGOS DA REVISÃO DA LITERATURA.....	23
FIGURA 2 – INVERSOR FORMADOR DE REDE	35
FIGURA 3 – INVERSOR SEGUIDOR DE REDE	35
FIGURA 4 – INVERSOR DE SUPORTE À REDE: a) INVERSOR OPERANDO COMO FONTE DE TENSÃO; b) INVERSOR OPERANDO COMO FONTE DE CORRENTE.....	36
FIGURA 5 – DIAGRAMA DE CONTROLE DE UM VSI CONTROLADO NO MODO CORRENTE (CCVSI).....	38
FIGURA 6 – DIAGRAMA DE UM VSI CONTROLADO NO MODO TENSÃO (VCVSI).	39
FIGURA 7 – ESTRUTURA BÁSICA DE UM PLL (<i>PHASE LOCKED LOOP</i>).....	40
FIGURA 8 – MODELO DE UM VSI CONECTADO A UM BARRAMENTO CA	41
FIGURA 9 – CURVAS DO CONTROLE DROOP TENSÃO E FREQUÊNCIA.	44
FIGURA 10 – CURVAS DO CONTROLE DROOP DA TENSÃO COM O CONTROLE DROOP.....	44
FIGURA 11 – DIAGRAMA DE BLOCOS DO SISTEMA DE CONTROLE COM UMA MALHA DE IMPEDÂNCIA VIRTUAL	45
FIGURA 12 – LABORATÓRIO DE MICRORREDES DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA (DELT) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ.....	47
FIGURA 13 – CONFIGURAÇÃO DA MICRORREDE EM ESTUDO	48
FIGURA 14 – CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMÁVEL S7 – 1500 COM O CPU 1515-2 PN E OS MÓDULOS DE ENTRADA E SAÍDA.	49
FIGURA 15 – INTERFACE HOMEM MÁQUINA (IHM)	50
FIGURA 16 – INVERSOR BIDIRECIONAL TRU CONVERT AC 3025	51
FIGURA 17 – CURVA DE CONTROLE DROOP DE FREQUÊNCIA (A) E DE TENSÃO (B) DO INVERSOR BIDIRECIONAL	53
FIGURA 18 – CURVA DO COEFICIENTE DROOP DE FREQUÊNCIA (a) E TENSÃO (b) (DIFERENTES VALORES DE Droopkp E Droopkq)....	55
FIGURA 19 – CONVENÇÃO DE SINAIS DE POTÊNCIA PARA O INVERSOR OPERANDO COMO PRODUTOR.....	55

FIGURA 20 – DIAGRAMA DE UM CCVSI COM O DROOP REVERSO.....	57
FIGURA 21 – DIAGRAMA DO CONTROLE DROOP REVERSO IMPLEMENTADO NO CLP.....	58
FIGURA 22 – CONFIGURAÇÃO 1: MICRORREDE ILHADA COM UM VSI FORMADOR DE REDE	60
FIGURA 23 – MICRORREDE ILHADA COM DOIS VCVSIS COMO FORMADORES DE REDE	64
FIGURA 24 - MICRORREDE ILHADA COM UM VCVSI FORMADOR DE REDE E UM CCVSI DE SUPORTE À REDE	71
FIGURA 25 – PARÂMETROS DO MB_CLIENT	89

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 – CONTROLE DROOP P-f EM UMA MICRORREDE ILHADA COM APENAS UM VCVSI FORMADOR DE REDE (DroopKp = 2%).....	61
GRÁFICO 2 – CONTROLE DROOP P-f EM UMA MICRORREDE ILHADA COM APENAS UM VCVSI FORMADOR DE REDE (DroopKp = 4%).....	62
GRÁFICO 3 – CONTROLE DROOP Q-V EM UMA MICRORREDE ILHADA COM APENAS UM VCVSI FORMADOR DE REDE (DroopKq = 5%).....	63
GRÁFICO 4 – CONTROLE DROOP Q-V EM UMA MICRORREDE ILHADA COM APENAS UM VCVSI FORMADOR DE REDE (DroopKq = 10%).....	63
GRÁFICO 5 – COMPARTILHAMENTO DE POTÊNCIA ATIVA ENTRE VCVSIs (Droopkp1 = Droopkp2 = 4%)	65
GRÁFICO 6 – COMPARTILHAMENTO DE POTÊNCIA ATIVA ENTRE DOIS VCVSIs (DroopKp1 = 4%, Droopkp2 = 2%).....	66
GRÁFICO 7 – COMPARTILHAMENTO DE POTÊNCIA REATIVA ENTRE DOIS VCVSIs (Droopkq1 = Droopkq2 = 10%).....	67
GRÁFICO 8 – COMPARTILHAMENTO DE POTÊNCIA REATIVA CAPACITIVA E INDUTIVA ENTRE DOIS VCVSIs (Droopkq1 = Droopkq2 = 10%)	68
GRÁFICO 9 – COMPARTILHAMENTO DE POTÊNCIA REATIVA ENTRE DOIS VCVSIs (Droopkq1 = 10% e Droopkq2 = 5%).....	69
GRÁFICO 10 – COMPARTILHAMENTO DE POTÊNCIA REATIVA CAPACITIVA E INDUTIVA ENTRE DOIS VCVSIs (Droopkq1 = 10% e Droopkq2 = 5%)	70
GRÁFICO 11 – COMPARTILHAMENTO DE POTÊNCIA ATIVA ENTRE UM VCVSI E UM CCVSI (Droopkp1 = Droopkp2 = 4%)	72
GRÁFICO 12 – COMPARTILHAMENTO DE POTÊNCIA ATIVA ENTRE UM VCVSI E UM CCVSI (Droopkp1 = 2% e Droopkp2 = 4%)	74
GRÁFICO 13 – COMPARTILHAMENTO DE POTÊNCIA REATIVA ENTRE UM VCVSI E UM CCVSI (Droopkq1 = Droopkq2 = 10%).....	75
GRÁFICO 14 – COMPARTILHAMENTO DE POTÊNCIA REATIVA (CAPACITIVA E INDUTIVA) ENTRE UM CCVSI E UM VCVSI (Droopkq1 = Droopkq2 = 10%).....	76
GRÁFICO 15 – COMPARTILHAMENTO DE POTÊNCIA REATIVA ENTRE UM VCVSI E UM CCVSI (Droopkq1=5% e Droopkq2 = 10%).....	77

GRÁFICO 16 – COMPARTILHAMENTO DE POTÊNCIA REATIVA (CAPACITIVA E INDUTIVA) ENTRE UM CCSI E UM VCVSI (Droopkq1 = 5% e Droopkq2 = 10%)	78
---	----

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – COMBINAÇÃO DAS PALAVRAS-CHAVE	22
QUADRO 2 – NÚMERO DE PUBLICAÇÕES ENCONTRADAS EM CADA BASE DE DADOS	22
QUADRO 3 – LISTA DOS ARTIGOS SELECIONADOS (CONTINUA).....	24
QUADRO 4 – RESUMO DOS PRINCIPAIS ASPECTOS DOS ARTIGOS SELECIONADOS (CONTINUA).....	31
QUADRO 5 – INFORMAÇÕES TÉCNICAS DO CLP SIMATIC S7-1515-2 PN.....	50
QUADRO 6 – INFORMAÇÕES TÉCNICAS DO INVERSOR TRU CONVERT AC 3025 (LADO CA).....	51
QUADRO 7 – INFORMAÇÕES TÉCNICAS DO INVERSOR TRU CONVERT AC 3025 (LADO CC).....	52
QUADRO 8 – PARÂMETROS DO CONTROLE DROOP P-F CONFIGURADOS NO INVERSOR.	90
QUADRO 9 – PARÂMETROS DO CONTROLE DROOP Q-V CONFIGURADOS NO INVERSOR.	90

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

ANEEL	- Agência Nacional de Energia Elétrica
CA	- Corrente Alternada
CC	- Corrente Contínua
CCVSI	- <i>Current-controlled Voltage Source inverter</i>
CLP	- controladores lógicos programáveis
DELT	- Departamento de Engenharia Elétrica
DER	- <i>Distributed Energy Resource</i>
DOI	- <i>Digital Object Identifier</i>
EMS	- <i>Energy Management System</i>
EPE	- Empresa de Pesquisa Energética
ESS	- <i>Energy Storage System</i>
GD	- Geração Distribuída
IEA	- <i>International Energy Agency</i>
IEEE	- <i>Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos</i>
IHM	- Interface Homem Máquina
LF	- <i>Low pass filter</i>
PCC	- <i>Point of Common Coupling</i>
PD	- Phase detector
PLL	- <i>Phase Locked Loop</i>
RMS	- <i>root mean square</i>
RTU	- <i>Remote Terminal Unit</i>
SIN	- Sistema Interligado Nacional
TCP	- <i>Transmission Control Protocol</i>
VCO	- <i>Voltage Controlled Oscillator</i>
VCVSI	- <i>Voltage-controlled Voltage Source inverter</i>
VSI	- <i>Voltage Source inverter</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 PROBLEMA	19
1.2 OBJETIVOS	19
1.2.1 Objetivo geral	19
1.2.2 Objetivos específicos.....	20
1.3 JUSTIFICATIVA	20
2 REVISÃO DE LITERATURA	22
2.1 ANÁLISE DA LITERATURA.....	25
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	33
3.1 COMPARTILHAMENTO DE POTÊNCIA EM UMA MICRORREDE ILHADA.....	33
3.2 CLASSIFICAÇÃO DOS INVERSORES DE ACORDO COM OS MODOS DE OPERAÇÃO EM UMA MICRORREDE	34
3.3 CONTROLE HIERÁRQUICO	36
3.3.1 Malhas de controle de tensão e corrente	37
3.3.2 Mecanismo de Sincronização.....	39
3.3.3 Controle Droop	40
3.3.4 Impedância Virtual.....	44
4 MATERIAIS E MÉTODOS	47
4.1 ESTRUTURA DO LABORATÓRIO DE MICRORREDES.....	47
4.1.1 Controlador Lógico Programável Simatic S7-1515-2 Pn	49
4.1.2 Interface Homem Máquina	50
4.1.3 Conversor Bidirecional Trueconvert Ac 3025.	51
4.2 COMISSIONAMENTO E CONFIGURAÇÃO DA MICRORREDE.....	55
4.3 IMPLANTAÇÃO DO CONTROLE DROOP REVERSO	56
5 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	59
5.1 CONFIGURAÇÃO 1 – MICRORREDE COM UM INVERSOR FORMADOR DE REDE.....	59
5.2 CONFIGURAÇÃO 2 – MICRORREDE COM DOIS INVERSORES FORMADORES DE REDE.....	64
5.3 CONFIGURAÇÃO 3 – MICRORREDE COM UM VSI FORMADOR DE REDE E UM VSI DE SUPORTE À REDE.	70
5.4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	78

6 CONCLUSÃO	81
6.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	83
REFERÊNCIAS.....	84
APÊNDICE 1 – PARÂMETROS DO CONTROLE DROOP E SEUS REGISTRADORES MODBUS	89
APÊNDICE 2 – PARÂMETROS DO CONTROLE DROOP E SEUS REGISTRADORES MODBUS	90

1 INTRODUÇÃO

O cenário elétrico atual está passando por um processo de transição, a produção de energia elétrica de forma centralizada, baseada em grandes usinas de geração, está dando espaço para sistemas de energia cada vez mais descentralizados, com uma crescente inserção de fontes de energia renováveis na forma de geração distribuída (GD) (DU et al., 2020; ROSINI et al., 2021).

O rápido crescimento da procura global por eletricidade e a necessidade de utilizar fontes de energia mais amigáveis para o ambiente faz acelerar o crescimento de geração de energia baseados em recursos renováveis. De acordo com o relatório da Agência Internacional de Energia (*International Energy Agency – IEA*) de 2023, as fontes renováveis serão responsáveis por 42% da geração global de eletricidade até 2028, com a geração distribuída representando uma parcela relevante no processo. Estima-se que aproximadamente 25% dessa geração será proveniente da energia eólica e solar fotovoltaica. No cenário brasileiro a capacidade instalada de geração distribuída saiu de 5,309 GW em 2014 para 26,627 GW em 2023 e de acordo com as projeções deve ultrapassar 40 GW até 2040 (EPE, 2024).

Com a tendência da rede elétrica em ter sua geração de energia cada vez mais distribuída, as áreas de geração e distribuição de energia não podem mais ser concebidas separadamente. Projetos de redes elétricas precisam considerar um novo cenário em que geradores de energia distribuídos e dispositivos de armazenamento de energia são interligados na rede, na maioria dos casos, próximos do local de consumo (GUERRERO et al., 2017). Neste contexto o conceito de microrredes foi introduzido como uma forma de permitir a inserção de diferentes recursos energéticos distribuídos (*distributed energy resources - DERs*) controlando e minimizando os efeitos adversos resultantes de sua inserção em larga escala na infraestrutura elétrica.

Microrredes possibilitam a gestão de forma eficiente e segura de diferentes fontes de GD, Sistema de Armazenamento de Energia e cargas, permitindo com que o conjunto seja lido pela rede de distribuição como uma única unidade controlável (TEMBO, 2016). São capazes de resolver problemas energéticos localmente, aumentando assim a flexibilidade e a confiabilidade da infraestrutura existente do sistema elétrico (GUERRERO et al., 2017) e satisfazem as necessidades da gestão pelo lado da demanda, sendo considerado um dos principais blocos para criação de

redes elétricas inteligentes (AHMETHODZIC; MUSIC, 2021; ANDISHGAR; GHOLIPOUR; HOOSHMAND, 2017).

Uma das principais características das microrredes é a sua capacidade de se desconectar da rede principal e operar de forma ilhada, ou operar de forma isolada em regiões remotas sem o suporte da rede principal (HIRSCH; PARAG; GUERRERO, 2018). Na operação ilhada e na operação isolada, a microrrede é responsável não apenas pela regulação de tensão e da frequência, que precisam permanecer constantes, mas também pelo compartilhamento de potência entre as diferentes DERs disponíveis, para garantir que não haja sobrecarregamento de uma das fontes.

O método mais utilizado para o compartilhamento de potência é o método controle droop. O método replica comportamento de máquinas síncronas, utilizando a relação entre a frequência e a potência ativa ($P-\omega$) e entre a tensão e a potência reativa ($Q-V$) para realizar o compartilhamento de energia e a regulação da tensão e frequência sem a necessidade de comunicação entre os inversores paralelos (WANG et al., 2017).

As interfaces entre os DERs e as microrredes são frequentemente baseadas em conversores eletrônicos de potência (GUERRERO et al., 2011). Em microrredes CA geralmente usa-se os inversores de tensão (voltage source inverters – VSIs). Os VSIs podem operar como formadores de rede, seguidores de rede e de suporte à rede. Os VSIs formadores de rede são geralmente controlados no modo tensão (VCVSI) para gerar a frequência e a tensão da rede de modo a "formar" a rede, por isso são indispensáveis na operação ilhada de uma microrrede. Por outro lado, os VSIs seguidores da rede são controlados no modo corrente (CCVSI) para gerar potência ativa e reativa com base na fase sincronizada da rede (WU et al., 2014). Os VSIs de suporte à rede podem ser CCVSI ou VCVSI, operam conectados a uma rede e precisam de uma malha de controle droop que lhes permite participar da regulação da frequência e tensão da rede em que estão conectados.

O presente trabalho pretende analisar o compartilhamento de carga de dois VSIs em uma microrrede CA ilhada com o controle droop. Duas configurações serão estudadas: (1) O compartilhamento de potência dois VCVSI operando em paralelo com o controle droop para o compartilhamento de carga; (2) O compartilhamento de potência entre um VCVSI e um CCVSI em paralelo controlados pelo droop e droop reverso, respectivamente. A pesquisa será realizada em uma microrrede montada no

laboratório de microrredes do Departamento de Engenharia Elétrica (DELT) da Universidade Federal do Paraná.

1.1 PROBLEMA

Em microrredes operando de forma ilhada, a tensão e a frequência da rede CA precisa ser regulada pelas fontes geradoras conectadas na microrrede, dado que não há a presença do sistema interligado nacional (SIN). Por isso, o controle dessas microrredes apresenta alguns desafios adicionais (ANDISHGAR; GHOLIPOUR; HOOSHMAND, 2017; ROSINI et al., 2021; SHOEIBY et al., 2014), tais como:

a) Uma vez que a maior parte das fontes geradoras utilizadas na GD e sistemas de armazenamento de energia são conectadas por intermédio de inversores de tensão, o sistema apresenta uma baixa inércia, conseqüentemente o equilíbrio da tensão e da frequência necessitam de um controle robusto para lidar com a entrada e a saída da carga.

b) O compartilhamento de carga deve ser preciso de modo que não haja sobrecarregamento de nenhum dos DERs disponíveis.

c) As fontes geradoras são, geralmente, baseadas em energias renováveis, que são, na sua maioria, variáveis. Assim sendo, o sistema de controle precisa de uma boa coordenação entre as fontes, o sistema de armazenamento e as cargas.

1.2 OBJETIVOS

Esta seção apresenta o objetivo geral e os objetivos específicos do trabalho. Serão apresentadas as metas que se propõe a atingir ao final da pesquisa.

1.2.1 Objetivo geral

O presente trabalho pretende avaliar o compartilhamento descentralizado de potência entre inversores operando nos modos VCVSI e CCVSI em uma microrrede CA ilhada.

1.2.2 Objetivos específicos

1. Realizar o comissionamento dos inversores bidirecionais a partir do CLP, e configurar a microrrede ilhada.
2. Implementar o compartilhamento de potência com o método de controle droop considerando dois VCVSIs operando em paralelo.
3. Implementar um sistema de controle com paralelismo entre um VCVSI e um CCVSI utilizando o controle droop e o droop reverso, respectivamente.
4. Avaliar as influências dos modos de operação dos inversores (VCVSI e CCVSI) no compartilhamento descentralizado de potência em uma microrrede CA ilhada.

1.3 JUSTIFICATIVA

A possibilidade de operação no modo ilhado proporciona benefícios adicionais para microrredes. Além de oferecerem segurança para o consumo local, suprimindo a demanda de energia na ausência ou falha do sistema elétrico principal, a operação no modo isolado é uma boa alternativa para regiões distantes, ilhas ou regiões sem acesso ao sistema interligado nacional. Vários estudos já abordaram o paralelismo de inversores com o controle droop em microrredes CA ilhadas, porém a maioria teve como foco o paralelismo de VCVSIs.

A maioria dos trabalhos que abordam o paralelismo entre CCVSI e VCVSI utilizam o controle mestre escravo, que necessita de comunicação entre as diferentes unidades geradoras, o que é uma limitação em comparação ao controle droop. Este, por operar com informações locais, não sofre com atrasos ou falhas de comunicação, capazes de levar a microrrede à instabilidade, e aumenta a possibilidade de expansão geográfica da microrrede.

O compartilhamento de potência entre VCVSIs e CCVSI de forma descentralizada, em que o CCVSI opera com a função de suporte à rede, é importante em muitos cenários. Muitos VSIs não são projetados para operarem como VCVSI, e a alta penetração de CCVSI em uma microrrede de baixa tensão pode criar problemas na qualidade da energia. Uma forma de minimizar isso é fazer os CCVSI operarem com função de suporte à rede e participarem no compartilhamento de potência das cargas disponíveis na microrrede. Nessas ocasiões, um CCVSI pode ser utilizado

como suporte à rede através de um controle externo implementado em um CLP (uma solução de baixo custo que permite a expansão da microrrede ilhada ou isolada). Adicionalmente, os VSIs operando nesse modo reduzem a corrente de curto-circuito da rede ilhada.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo é apresentado uma revisão sistemática de literatura sobre publicações relacionadas ao tema do presente trabalho. A busca e a seleção dos materiais para o portfólio bibliográfico foram feitas com o auxílio dos softwares Harzing's Publish or Perish (software de gerenciamento de referências), Microsoft Excel e Mendeley.

Como palavras-chave foram usados os termos: "Microgrid", "Islanded", "Reverse Droop", "grid forming", "grid following", "grid supporting", "Voltage Control Mode", "Current Control Mode". Para verificar se estão levando a artigos relacionados ao tema, foi feito um teste de aderência, ou seja, foram selecionados alguns artigos no Google Scholar, e foi feita uma breve revisão desses artigos. O teste de aderência confirmou que as palavras-chave estão alinhadas com o conteúdo do trabalho. Uma combinação entre essas palavras-chave (QUADRO 1) foi usada para pesquisar por artigos em três bases de dados (Google scholar, Scopus e IEEE). As palavras-chave podiam estar no título, no resumo ou nas palavras-chave dos artigos. No final do processo foram levantados 4519 artigos. O QUADRO 2 apresenta a quantidade de artigos selecionados para cada combinação nos três bases de dados.

QUADRO 1 – COMBINAÇÃO DAS PALAVRAS-CHAVE

I	(Microgrid) AND ("Stand alone" OR "Islanded") AND (droop)
II	(Microgrid) AND (reverse droop)
IV	("microgrid") AND ("grid-forming") AND ("grid-following")
V	(Microgrid) AND ("grid supporting")
VI	("Voltage Control Mode) AND (Current Control Mode)

FONTE: O autor (2023).

QUADRO 2 – NÚMERO DE PUBLICAÇÕES ENCONTRADAS EM CADA BASE DE DADOS

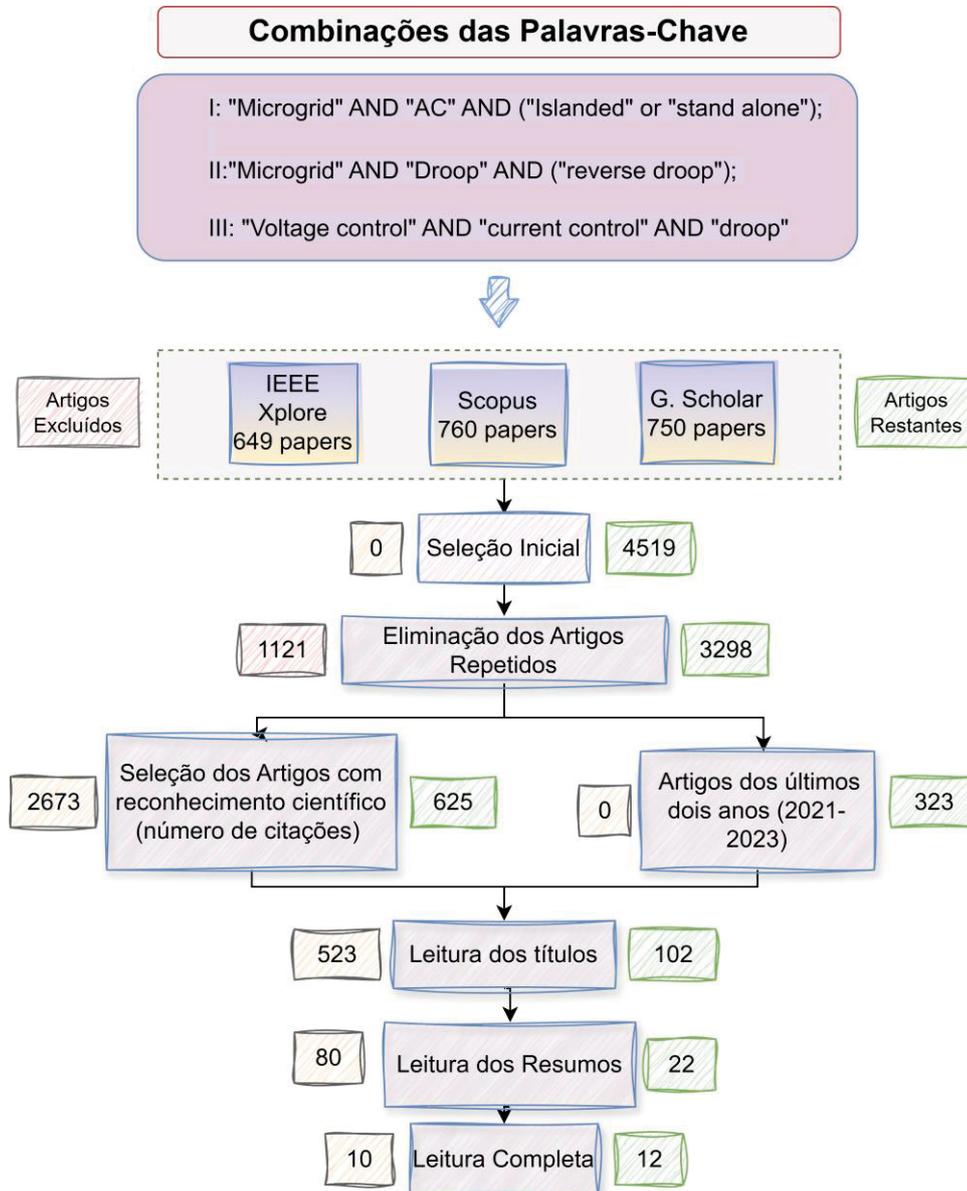
	I	II	III	IV	Domínio	Período
Scopus	210	377	293	238	Title & Keywords	1900-2023
Google scholar	300	425	325	473	Title & Keywords	1900-2023
IEEE	504	532	403	439	All metadata	1900-2023

FONTE: O autor (2024).

O processo de filtragem das publicações presentes na base dados passou pelas seguintes etapas: remoção dos artigos repetidos, seleção dos artigos com

reconhecimento científico (número de citações), leitura dos títulos, leitura dos resumos e leitura do texto completo, como apresentado na FIGURA 1.

FIGURA 1 – PROCESSO DE SELEÇÃO DOS ARTIGOS DA REVISÃO DA LITERATURA



FONTE: O autor (2024).

Os artigos duplicados foram eliminados a partir da comparação dos endereços DOI (Digital Object Identifier), sendo excluído 27% dos artigos do banco inicial, restando 3298.

Os artigos restantes foram separados em duas partes: uma com obras publicadas há pelo menos três anos, ou seja, publicados antes de 2021, e outra com artigos com menos de três anos de publicação (publicados depois de 2021). Na

primeira parcela, foi feita uma seleção com base na relevância das obras (levando em consideração o número de citação por ano). Foram selecionados um total de 625 artigos, responsáveis por 85% do total das citações por ano. Optou-se por utilizar o número de citação por ano ao invés do número total de citação para não privilegiar os artigos mais antigos. Na segunda parcela, todos os artigos (um total de 323) passaram para a etapa da leitura dos títulos.

Na etapa de leitura dos títulos, foram selecionados os artigos relacionados ao controle droop convencional em microrredes AC ilhadas, ao controle droop convencional com impedância virtual, à operação de inversores no modo corrente (CCVSI) e no modo tensão (VCVSI). O processo resultou na seleção de 102 artigos. Em seguida, foi feita a leitura dos resumos, de onde foram selecionados 28 artigos. Por fim, foi feita a leitura completa das obras, de onde restaram 12 publicações para o portfólio final. Mais quatro artigos foram adicionados, por serem artigos comumente citados pelos artigos do portfólio e por estarem relacionados com o tema do trabalho. A lista dos artigos selecionados é apresentada no QUADRO 3.

QUADRO 3 – LISTA DOS ARTIGOS SELECIONADOS

(CONTINUA)

Autores	Título	Ano	Citação
Chandorkar, M. C. et al.	<i>Control of parallel connected inverters in standalone ac supply systems</i>	1993	2128
Tuladhar, A. et al.	<i>Control of parallel inverters in distributed ac power systems with consideration of line impedance effect.</i>	2000	772
Guerrero, J. M. et al.	<i>Output impedance design of parallel-connected UPS inverters</i>	2004	1492
Wu, D. et al.	<i>Control and analysis of droop and reverse droop controllers for distributed generations.</i>	2014	63
Villa, Al. et al.	<i>Conventional and reverse droop control in islanded microgrid: Simulation and experimental test</i>	2016	30
Vinayagam, A. et al.	<i>PV Based Microgrid with Grid-Support Grid-Forming Inverter Control-(Simulation and Analysis)</i>	2017	42
Wang, S. et al.	<i>Breaking the boundary: A droop and master-slave hybrid control strategy for parallel inverters in islanded microgrids</i>	2017	18
Pattabiraman, D & Lasseter, R H	<i>Comparison of grid following and grid forming control for a high inverter penetration power system</i>	2018	321
Yang, J. et al.	<i>A novel quasi-master-slave control frame for PV-storage independent microgrid</i>	2018	55
Mousavi, S. et al.	<i>Autonomous Control of Current-and Voltage-Controlled DG Interface Inverters for Reactive Power Sharing and Harmonics Compensation in Islanded Microgrids</i>	2018	68
Vijay, A. S. et al.	<i>An adaptive virtual impedance control for improving power sharing among inverters in islanded ac microgrids</i>	2021	84

QUADRO 3 – LISTA DOS ARTIGOS SELECIONADOS

(CONCLUSÃO)

Autores	Título	Ano	Citação
Sadeque, F. et al.	<i>Power-Sharing between Grid-Forming and Grid-Following Inverters</i>	2021	5
Verbe, S. et al.	<i>Comparative Study of GFM-grid and GFL-grid in Islanded Operation</i>	2021	5
Zuo, Y. et al.	<i>Performance assessment of grid-forming and grid-following converter-interfaced battery energy storage systems on frequency regulation in low-inertia power grids</i>	2021	68
Araia, J. & Taguchi, Y	<i>Coordinated control between a grid forming inverter and grid following inverters supplying power in a standalone microgrid</i>	2022	3
Kikusato, H. et al.	<i>Performance evaluation of grid-following and grid-forming inverters on frequency stability in low-inertia power systems by power hardware-in-the-loop testing</i>	2023	13

FONTE: O autor (2023).

2.1 ANÁLISE DA LITERATURA

A implementação do controle droop para o paralelismo de inversores sem a necessidade de comunicação vem sendo bastante estudada. Em Chandorkar, Divan e Adapa (1993), foi apresentado uma arquitetura com inversores conectados em paralelo em uma microrrede CA ilhada, onde o controle droop foi utilizado para eliminar a necessidade de comunicação entre as diferentes fontes de geração distribuída. Em Tuladhar et al., (2000) foi proposta uma técnica de controle droop capaz de lidar com cargas lineares e não lineares. Nesses casos, o controle droop foi projetado considerando a impedância de saída indutivo, devido ao indutor do filtro de saída e ao alto componente indutivo da impedância de linha. No entanto, isso nem sempre é verdade, em microrredes de baixa tensão, por exemplo, o componente resistivo da impedância de linha é alto, o que pode afetar o desacoplamento entre a potência ativa e a potência reativa. Para evitar o uso de indutores físicos, uma solução consiste em adicionar impedâncias virtuais (loops de controle rápido que emulam a impedância de saída desejada). Vijay et al., (2021) apresentaram uma técnica adaptativa descentralizada para ajustar a impedância virtual no controle de uma microrrede ilhada. A metodologia permite alterar a impedância virtual de acordo com a corrente de saída dos geradores distribuídos e, assim, obter compartilhamento de potência proporcional aprimorado para diferentes relações X/R das linhas da rede.

Os artigos apresentados abordaram a aplicação do controle droop e da impedância virtual na operação em paralela de VCVSIs em microrredes ilhadas, mas, pouco foi mostrado sobre implementação do controle droop em CCVSIs. Referências como Kikusato, et al. (2023); Verbe, Shigenobu e Ito (2021); Pattabiraman, Lasseter e jahns (2018) e ZUO, et al. (2021) estudaram a operação de CCVSIs em microrredes ilhadas trazendo uma comparação do seu desempenho CCVSIs com VCVSIs.

Pattabiraman, Lasseter e jahns (2018) estudaram a dinâmica de frequência em uma microrrede ilhada, alimentada por máquinas síncronas e recursos energéticos baseados em inversores. O estudo se focou em uma análise comparativa da performance dos dois modos de operação (VCVSI e CCVSI) na estabilização da frequência considerando diferentes taxa de inserção dos VSIs (5%, 20%, 50% e 80%). A taxa de inserção do VSI se refere ao percentual de inversores presentes em relação às máquinas síncronas na rede. Por meio de estabilidade de pequenos sinais e de simulações no domínio do tempo, o estudo revela um desempenho mais aprimorado de VCVSIs controlados por droop em comparação a CCVSIs controlados por droop reverso. Com o aumento no nível de penetração do inversor, os CCVSIs apresentaram um amortecimento reduzido de frequências mais altas. Por outro lado, os VCVSIs apresentaram maior amortecimento de frequência de pico.

Um estudo semelhante ao Pattabiraman, Lasseter e jahns (2018) foi realizado por Verbe, Shigenobu e Ito (2021). Fizeram uma análise comparativa entre VCVSIs e CCVSIs na estabilização da frequência da rede considerando diferentes taxas de inserção. O estudo foi realizado em uma microrrede de cinco geradores em operação ilhada. Inicialmente, todos os cinco geradores são máquinas síncronas. Na sequência foram realizados testes com uma taxa de inserção de 10%, 20%, 30% e 35% de CCVSI. Pelos resultados, a partir de 35% a frequência colapsa. Para os VCVSIs foram testadas as taxas de integração de 20%, 40%, 80% e 100%. Pelos resultados, os VCVSIs são capazes de manter a potência estável até com 100% de integração.

Kikusato et al. (2022) realizaram testes semelhantes aos dois estudos anteriores. O estudo foi feito a partir de protótipos de inversores de diferentes fabricantes, comparando o seu desempenho em relação à métodos de controle e condições de penetração de VSIs na rede. Os resultados mostram que os CCVSIs podem melhorar a estabilidade da frequência com uma taxa de inserção de 60%, acima desse valor, a frequência da rede começa a perder estabilidade. Em relação à

tolerância das configurações de parâmetro de controle, os CCVSI foram mais sensíveis que os VCVSI.

Zuo et al., (2021) modelaram um sistema de armazenamento de energia feito de baterias e compararam a dinâmica de controle entre VCVSI e CCVSI em uma microrrede de baixa inércia. Malhas de controle droop foram incluídos para que os VSIs operassem como suporte de rede. Para avaliar o desempenho dos modos de controle do sistema de armazenamento de energia num contexto operativo prático, foram consideradas longas simulações diárias. Nas simulações, foram atribuídos níveis de reserva para contenção e restauração de frequências considerando a prática atual de um operador de rede de transporte na Europa. Os resultados mostraram que a estratégia de controle com VCVSI superam os com CCVSI obtendo melhor controle e estabilização de frequência e uma menor taxa relativa de mudança de frequência. É também demonstrado que sistemas de armazenamento em larga escala são capazes de melhorar significativamente a controle de frequência do sistema.

Apesar de apresentar a implementação de CCVSI em microrredes ilhadas, os artigos apresentados não abordam o paralelismo entre VCVSI e CCVSI. Vinaygam et al. (2017) abordaram o paralelismo entre VCVSI e CCVSI em uma microrrede de baixa tensão. O controle droop e uma impedância virtual de saída foram implementados no VCVSI enquanto o CCVSI atua como um seguidor de rede. Uma análise da operação da microrrede foi feita com a microrrede operando conectado a rede, no modo ilhado, e durante a transição entre os dois modos. O desenvolvimento e a análise da proposta foram feitos no ambiente do software Matlab-Simulink. No modo ilhado, os resultados mostraram uma maior variação na potência e nos níveis de tensão/frequência em comparação ao modo conectado a rede. Segundo os autores, deve-se à falta de disponibilidade de inércia de energia na microrrede ilhada e também à influência do desempenho do controlador baseado em PI durante os estágios transitórios na microrrede.

Wu et al., (2014) abordaram o paralelismo de VCVSI e CCVSI em uma microrrede ilhada, introduzindo o conceito de “droop reverso” para se referir ao controle droop aplicado em CCVSI. A fim de validar a estratégia de controle droop e droop reverso para unidades de armazenamento e de recursos energéticos distribuídos, simulações de *hardware-in-the-loop* (HiL) foram utilizadas com base na plataforma dSPACE 1006. O controle do compartilhamento de potência ativa teve um bom desempenho, com todas as unidades apresentando o mesmo valor de frequência

no PCC. Quanto ao compartilhamento da potência reativa, como os CCVSI detectam a frequência do PCC com um PLL, ocorreu desequilíbrio de potência reativa entre CCVSI e VCVSI. No entanto esse compartilhamento tende a melhorar com o aumento dos coeficientes droop.

Villa et al. (2016) Implementaram o paralelismo de VCVSI e CCVSI no controle de uma microrrede ilhada de baixa tensão. O controle droop convencional e o controle droop reverso foram aplicados no VCVSI e CCVSI, respectivamente. Devido às características resistivas das linhas de transmissão, foi utilizado um controle droop adequado para redes com características resistivas (P-V e Q-W). Para testar o modelo proposto, foram realizadas simulações no ambiente *ATPDraw (Alternative Transients Program)* e simulação em tempo real no dSPACE considerando parâmetros reais da Instalação de teste de geração distribuída da Ricerca sul Sistema Energetico – RSE S.p.A. Os resultados mostraram que a configuração com o paralelismo entre VCVSI e CCVSI é capaz de gerenciar uma microrrede ilhada de forma estável e com diferentes características de impedância.

Em Wang et al. (2017) foi desenvolvida uma estratégia de controle baseada em droop para o compartilhamento de potência entre VCVSI e CCVSI em uma microrrede. A proposta dos autores é de explorar as vantagens do controle droop e do controle mestre escravo. Um VCVSI controlado por droop convencional foi colocado para operar em paralelo com um CCVSI, cujas referências de potência de saída foram ajustadas com base em um mecanismo do droop reverso utilizado em Wu et al. (2014). Diferente de um sistema de controle mestre-escravo, o controle proposto não faz o uso de comunicação. Para evitar que todo sistema perca o suporte de tensão quando o VCVSI falhar, uma malha de controle de tensão de backup foi proposta para os CCVSI, fazendo este operar como um VCVSI quando o anterior sair de operação. Para simular e analisar o desempenho da estratégia proposta, foi construído um protótipo dos VSI no software PSCAD/EMTDC. Um modelo de espaço de estado de pequeno sinal foi derivado para analisar características do sistema paralelo geral. Resultados da simulação mostraram um melhor desempenho do paralelismo entre um VCVSI e um CCVSI em relação ao paralelismo entre dois VCVSI no compartilhamento da potência ativa e na estabilização da frequência da rede.

Em Mousavi et al. (2018) foi proposto um controle coordenado ente VCVSI e CCVSI para o compartilhamento de potência reativa e cancelamento de harmônicos de tensão. Os VCVSI contribuem para o cancelamento de harmônicos usando

impedância virtual capacitiva, que pode compensar totalmente o efeito da indutância de saída dos filtros LCL. Além disso, uma admitância virtual adaptativa regulada com base na capacidade dos CCVSI é implementada para as unidades CCVSI. Para o compartilhamento de potência reativa, métodos de controle droop e droop reverso são usados para VCVSI e para CCVSI, respectivamente. Para a validação do controle proposto, duas unidades DGs (uma VCVSI e uma CCVSI) foram utilizadas no trabalho experimental. O trabalho experimental foi realizado por meio de uma bancada de testes, composta por cargas não lineares e indutivas, inversores trifásicos e uma plataforma dSPACE 1006. Resultados mostram que o cancelamento de harmônicos é obtido com sucesso usando apenas medições locais.

Em Yang et al. (2018) foi proposto um sistema de controle para integrar sistemas fotovoltaicos e sistemas de armazenamento no mesmo barramento CA em uma microrrede ilhada utilizando VCVSI e CCVSI em paralelo. Similarmente ao Wang et al. (2017), comparam o sistema proposto a uma combinação dos recursos do controle droop e do mestre mestre-escravo. A configuração proposta dispensa comunicação entre os inversores e ao mesmo tempo possibilita os recursos de operação nos pontos de máxima potência do sistema fotovoltaico. Para investigar a validade de controle proposto, foi construída uma microrrede CA monofásica com duas fontes fotovoltaicas e um sistema de armazenamento em uma simulação computacional. Na sequência um protótipo de microrrede de laboratório foi construído. A microrrede consiste em duas microfuentes baseadas em inversores monofásicos. As simulações e os resultados experimentais verificaram que os sistemas fotovoltaicos podem atingir a utilização máxima de energia em tempo real e o desempenho dinâmico satisfatório com mudança de carga.

Sadeque, Sharma e Mirafza (2021) trabalharam com o controle do paralelismo entre inversores formadores e seguidores de rede para garantir o compartilhamento de potência e a regulação da tensão e frequência. Para validar a proposta, uma pequena microrrede, consistindo de dois inversores foi desenvolvida. A microrrede conta com um inversor comercial Allen Bradley Powerflex 755 de 10 kVA e um inversor trifásico baseado em SiC MOSFET montado no laboratório de 5 kVA. Dois processadores de sinais digitais (DSPs) dSPACE MicroLabBox DS-1202 foram usados como controladores e operados pelo software ControlDesk. Os controladores propostos para o VCVSI e o CCVSI foram testados juntos para obter o compartilhamento. Para iniciar o teste, o VCVSI foi ativado primeiro para verificar a

sua eficácia na regulação de frequência durante a variação de carga. O CCVSI foi conectado ao sistema após sincronizar a tensão e o ângulo de fase com os mesmos parâmetros no PCC. Para a potência ativa, o controle do CCVSI possui uma resposta lenta e o compartilhamento de potência ocorre de forma gradual na medida em que o CCVSI assume a sua parcela de potência ativa e reativa.

Araia e Taguchi (2022) estudaram o compartilhamento de potência em uma microrrede ilhada envolvendo VCVSIs e CCVSI. O estudo apresenta resultados de simulações computacionais do compartilhamento de potência entre um VCVSI e dois CCVSI, controlados por droop e droop reverso, respectivamente. O compartilhamento de potência foi analisado sob condições de variação de carga, mudança da potência de referência, mudança nos valores de referência de potência reativa e operação de três inversores. No primeiro caso o CCVSI entra com um atraso no compartilhamento de potência. Inicialmente o VCVSI alimenta a carga adicional e o CCVSI varia gradualmente até a carga ser igualmente compartilhada. Quanto a variação de referência de tensão os dois VSIs respondem ao mesmo tempo.

O QUADRO 4 mostra um resumo dos principais aspectos dos artigos selecionados. A partir do quadro, observa-se que, em Chandorkar, Divan e Adapa (1993), Thudalar et al. (2000) e Guerrero et al. (2007), foram abordados os conceitos do controle droop e da impedância virtual em VSIs, no entanto o foco desses trabalhos é no paralelismo entre VCVSIs. Kiusato et al. (2022), Verbe, Shigenobu e Ito (2021), Pitabaradan et al. (2018) e Zuo et al. (2021) compararam o desempenho de VCVSIs e CCVSI no suporte da frequência em uma microrrede ilhada, no entanto, não abordaram o paralelismo entre os dois modos de operação e não apresentaram o compartilhamento de potência entre VSIs em uma microrrede ilhada.

Wu et al. (2014), Villa et al. (2016), Yang et al. (2018), Sadeque, Sharma e Mirafza (2021), Mousavi et al. (2018) e Araia e Taguchi (2022) trabalharam com o paralelismo entre VCVSI e CCVSI em microrredes ilhadas utilizando o controle droop e droop reverso para estabilizar a frequência e compartilhar a potência das cargas. Os trabalhos, no entanto, não apresentaram uma comparação do desempenho do paralelismo entre VCVSI e CCVSI com o paralelismo entre dois VCVSIs.

Em Wang et al. (2017), foi apresentado uma comparação entre a configuração com o paralelismo entre VCVSI e CCVSI e o controle com o paralelismo entre dois VCVSIs. Os resultados mostraram um melhor desempenho do paralelismo entre

VCVSI e CCVSI. Esses resultados foram validados a partir de simulações computacionais.

Analisando os artigos apresentados, observa-se que alguns estudos abordaram paralelismo entre VCVSIs, outros entre VCVSIs e CCVSI, enquanto alguns abordaram ambas as técnicas, mas sem realizar uma comparação entre elas. Wang et al. (2017) realizou uma comparação entre as duas técnicas, só que foi feita por meio de simulação. O presente trabalho compara os dois modos de compartilhamento de potência utilizando dados de uma microrrede real.

QUADRO 4 – RESUMO DOS PRINCIPAIS ASPECTOS DOS ARTIGOS SELECIONADOS
(CONTINUA)

Referência	Proposta do trabalho	Abordagem de controle	Compartilhamento de potência	Modo de controle do VSI	Validação da proposta
Chandorkar et al. (1993)	Controle descentralizado de inversores em uma microrrede CA ilhada	Controle droop	Sim	Apenas VCVSI	Simulação
Tuladhar, A. Et al. (2000)	Compartilhamento de cargas lineares e não lineares em uma microrrede ilhada	Controle droop	Sim	Apenas VCVSI	Simulação e Resultado Experimental
Guerrero, J. M. Et al. (2004)	Impedância de saída no compartilhamento de potência entre vsis em uma microrrede CA ilhada.	"Average Feedback Linearization"; Impedância Virtual; controle droop;	Sim	Apenas VCVSI	Simulação e protótipo em laboratório
Vijay, A. Et al. (2021)	Técnica de impedância virtual no controle de uma microrrede ilhada	Impedância virtual adaptativa; Controle droop	Sim	Apenas VCVSI	Simulação
Pattabiraman, D., et al. (2018)	Análise comparativa do desempenho de um VCVSI e um CCVSI	Controle droop e droop reverso	Não	VCVSI e CCVSI	Simulação
Verbe, S. C., et al. (2021)	Análise comparativa do desempenho de VCVSI e CCVSI em uma microrrede ilhada.	Controle droop e droop reverso	Não	VCVSI e CCVSI	Simulação
Kikusato, H., et al. (2023)	Análise comparativa do desempenho de vcvsis e ccvsis na estabilização frequência da microrrede.	Controle droop e droop reverso	Não	VCVSI e CCVSI	Simulação em hardware-in-the-loop
Zuo, Y., et al. (2021)	Análise comparativa do desempenho dos inversores formadores de rede e seguidores de rede na estabilização da frequência.	Controle droop e droop reverso	Não	VCVSI e CCVSI	Simulação e protótipo em laboratório

QUADRO 4 – RESUMO DOS PRINCIPAIS ASPECTOS DOS ARTIGOS SELECIONADOS
(CONCLUSÃO)

Referência	Proposta do trabalho	Abordagem de controle	Compartilhamento de potência	Modo de controle do VSI	Validação da proposta
Wu, D. Et al. (2014)	Compartilhamento de potência entre vsis em uma microrrede CA ilhada	Controle droop e Controle droop reverso	Sim	VCVSI e CCVSI	Simulação em dspacel006 platform
Villa et al. (2016)	Compartilhamento de potência entre vcvsis e ccvsis em microrredes ilhadas de baixa tensão.	Controle droop, controle droop reverso	Sim	VCVSI e CCVSI	Simulações no Ambiente ATPDraw e DSPACE
Vinayagam, A. Et al. (2017)	Sistema de gerenciamento de energia descentralizado	Controle droop e impedância virtual	Sim	VCVSI e CCVSI	Simulação em Matlab-Simulink.
Wang, S., et al. (2017)	Paralelismo de VCVSI e CCVSI em uma microrrede alimentada por um sistema fotovoltaico.	Controle droop, droop reverso e controle mestre escravo	Sim	VCVSI e CCVSI	Protótipo em Laboratório
Mousavi, S. Y. M., et al. (2018)	Compensação harmônica e coordenação de potência reativa em unidades vcvsis e ccvsis em uma microrrede ilhada.	Impedância virtual capacitiva para VCVSI e admitância virtual par CCVSI	Sim	VCVSI e CCVSI	Teste com Inversores comerciais
Yang, J. Et al. (2018)	Controle de operação paralela de inversores em uma microrrede CA ilhada	Controle droop reverso; controle mestre escravo	Sim	VCVSI e CCVSI	Simulação Construída em PSCAD/EMTDC
Sadeque, F., et al. (2021)	Compartilhamento de potência entre um VCVSI e um CCVSI	Controle droop e droop reverso	Sim	VCVSI e CCVSI	Teste com Inversores Comerciais
Araia, J. & Taguchi, Y. (2022)	Compartilhamento de potência entre um VCVSI e um CCVSI	Controle droop e droop reverso	Sim	VCVSI e CCVSI	Simulação

Fonte: O autor (2024).

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção, são apresentados os conceitos fundamentais relacionados ao controle de uma microrrede ilhada, o que inclui os principais métodos de compartilhamento de potência, os modos de operação dos inversores (formação de rede, alimentação de rede e suporte à rede). São apresentados mais detalhes do controle primário, incluindo o controle das malhas internas (malhas de corrente e de tensão dos inversores) e o compartilhamento de potência a partir do controle droop.

3.1 COMPARTILHAMENTO DE POTÊNCIA EM UMA MICRORREDE ILHADA

O controle de compartilhamento de potência assegura que os DERs disponíveis participem na alimentação das cargas com uma potência proporcional à sua potência nominal. Cada DER entrega uma potência ativa e reativa de modo a satisfazer a demanda da carga sem sobrecarregar um DER em específico e sem degradar os níveis de tensão e frequência do PCC da microrrede (LEILA et al., 2021).

Diversas estratégias já foram propostas para o compartilhamento de potência em uma microrrede (YAMASHITA; VECHIU; GAUBERT, 2019; HASSAN et al., 2023; AMETHODZIC et al., 2021; ROKROK; SHAFIE-KHAH; CATALÃO, 2018). Essas estratégias podem ser agrupadas em dois grupos: controles com comunicação (controle centralizado e controle mestre escravo) e controles sem comunicação (controle droop).

Em técnicas de compartilhamento de carga centralizadas, há um controlador central que troca informação com cada um dos DERs presentes. Esse controlador central coleta informações necessárias, realiza os cálculos e determina as ações a serem realizadas por cada unidade. Esse método de controle garante um compartilhamento preciso de potência mesmo durante transientes. Porém, apresenta algumas desvantagens como o ponto único de falha, ou seja, todo o sistema falha quando o controlador central falhar, e a necessidade de comunicação de alta largura de banda, que pode encarecer a infraestrutura da microrrede e comprometer a operação em microrredes quando a distância entre os componentes for grande (LEILA, 2021).

No controle mestre-escravo, um DER é escolhido como o mestre e os outros operam como escravos. O mestre controla a tensão e a frequência do PCC e lida com

os transitórios durante perturbações do sistema. Os escravos seguem a tensão e a frequência estabelecidas pelo mestre enquanto fornecem potência ativa e reativa para a rede. Para garantir o compartilhamento de potência, uma comunicação é estabelecida entre o VSI mestre e os VSIs escravos (ADACHI, 2017). Em caso de falha no VSI mestre, muitos desses controles possuem estratégias para mudar o modo de operação de um dos VSIs que passará a funcionar como a nova unidade mestre. Sobressinais de corrente de saída do VSI durante transientes é uma das desvantagens deste método, uma vez que a corrente do conversor mestre não é controlada. Além disso, semelhante ao controle centralizado, a comunicação necessária entre os conversores limita a sua operação em áreas geográficas relativamente extensas e a capacidade de adicionar novos dispositivos sem alterar a configuração de todo o sistema (ROCKROK et al., 2018).

As técnicas de compartilhamento de potência que não fazem o uso de comunicação são baseadas no controle droop, que utiliza a medição local para controlar os DERs conectados na microrrede. O controle droop imita as operações do governador e da excitatriz em geradores síncronos. Esta abordagem de controle depende das relações lineares entre potência ativa e frequência, bem como potência reativa e amplitude de tensão (HASSAN et al., 2023). O fato de não contarem com canais de comunicação lhes confere alguns recursos desejáveis, como flexibilidade, capacidade de expansão, redundância e implementação simples (ROCKROK et al., 2018).

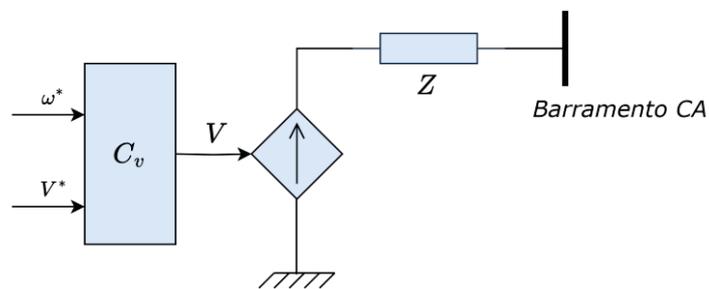
3.2 CLASSIFICAÇÃO DOS INVERSORES DE ACORDO COM OS MODOS DE OPERAÇÃO EM UMA MICRORREDE

Os conversores estáticos de potência são os principais atuadores em microrredes, além de servirem como interface entre os diferentes DERs e a microrrede, permitindo a conexão de fontes de diferentes naturezas, são os principais responsáveis pelo controle e o gerenciamento eficiente do fluxo de potência.

Em microrredes CA, os conversores estáticos de potência mais utilizados são os inversores de tensão (*Voltage Source Inverters -VSIs*) (DU et al., 2021). Levando em consideração o controle e modo de operação, os inversores podem ser classificados em três tipos básicos: inversores formadores de rede, inversores seguidores de rede e inversores de suporte à rede (ROCABERT et al., 2012).

Os inversores formadores de rede funcionam como fontes de tensão CA com uma dada amplitude E^* e frequência ω^* , conforme ilustrado na FIGURA 2. Em uma microrrede ilhada, são responsáveis por formar a rede, ou seja, a tensão CA gerada por esse inversor é usada como referência para o restante dos inversores seguidores de rede conectados a ele. Geralmente, são alimentados por fontes de GD estáveis e dispositivos de armazenamento como baterias, supercapacitores, SMES (*superconducting magnetic energy storage*), *flywheel* e outros.

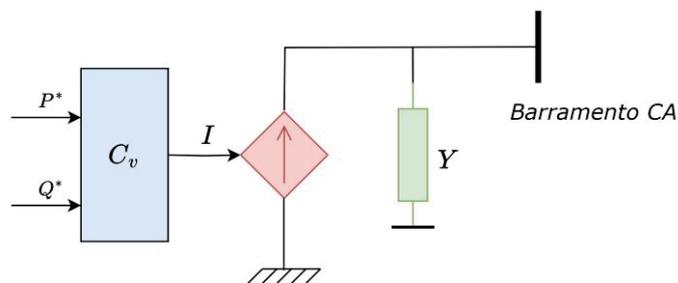
FIGURA 2 – INVERSOR FORMADOR DE REDE



FONTE: Adaptado de Rocabert et al. (2012).

Os inversores seguidores de rede são controlados para funcionarem como uma fonte de corrente ideal com uma admitância em paralelo (ROCABERT et al., 2012; ZUO et al., 2021; DU et al., 2021). Conforme mostra a FIGURA 3.

FIGURA 3 – INVERSOR SEGUIDOR DE REDE



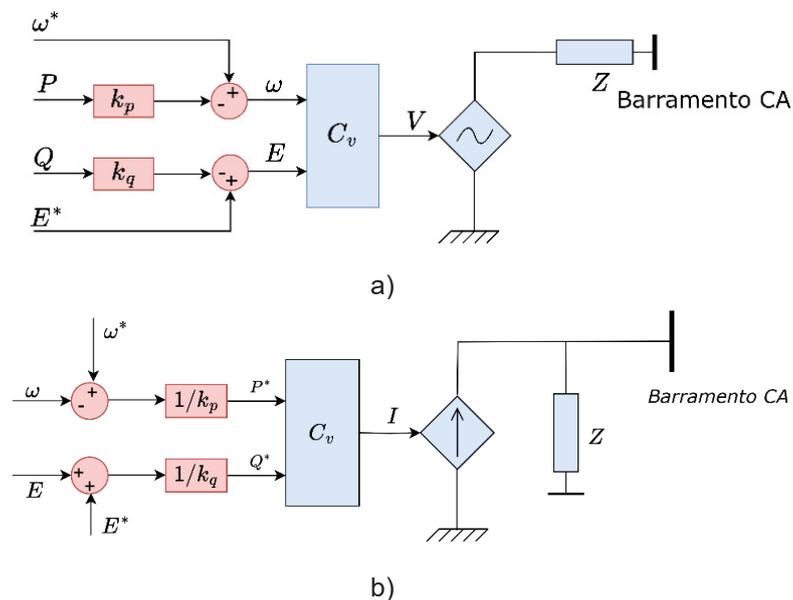
FONTE: Adaptado de Rocabert et al. (2012).

Os parâmetros de controle são a potência ativa e reativa, o que significa que não são capazes de determinar a tensão e a frequência da rede, mas sim dependem de uma fonte de tensão externa para fornecer a referências de tensão e frequência. Podem operar em uma microrrede ilhada entregando energia enquanto estão sincronizados com a tensão CA. O Processo de sincronização consiste em obter

informações de frequência, fase e amplitude da tensão da rede CA e usar essas informações nas malhas de controle interno a fim de regular a potência ativa e reativa trocadas com a microrrede.

Os inversores de suporte à rede são controlados para participarem da regulação da tensão e da frequência da rede em que estão conectados (VINAYAGAM, 2017). Podem ser controlados para funcionar como uma fonte de tensão ou como uma fonte de corrente, como mostrado na FIGURA 4. Contam com uma malha de controle droop, que permite regular a frequência e a tensão da saída do inversor a partir da potência ativa e reativa entregues pelo DER. Podem operar no modo conectado ou ilhado, participando da regulação da frequência e tensão da rede em que estão conectados. Vale mencionar que um conversor de suporte à rede, operando como uma fonte de corrente, não é capaz de formar a rede, ou seja, ainda necessita de uma fonte de tensão externa para fornecer a referência de tensão e frequência.

FIGURA 4 – INVERSOR DE SUPORTE À REDE: a) INVERSOR OPERANDO COMO FONTE DE TENSÃO; b) INVERSOR OPERANDO COMO FONTE DE CORRENTE



FONTE: Adaptado de Rocabert et al. (2012).

3.3 CONTROLE HIERÁRQUICO

O sistema de controle de uma microrrede, em muitas ocasiões, precisa lidar com múltiplos objetivos, por vezes conflitantes e em escalas de tempo diferentes, como aumentar o fornecimento de potência ativa sem degradar a frequência da

microrrede ilhada ou garantir o compartilhamento de potência reativa mantendo os desvios de tensão nos limites aceitáveis (YAMASHITA; VECHIU; GAUBERT, 2019).

Os diferentes métodos propostos para o controle de microrredes, que vão desde métodos totalmente centralizados a métodos totalmente descentralizados (AHMETHODZIC; MUSIC, 2021), na maioria das vezes, tratam cada requisito de operação de uma microrrede de forma separada. Para lidar com os múltiplos objetivos, estruturas de controle com diferentes níveis hierárquicos são frequentemente utilizadas. O nível hierárquico de um sistema de controle depende da sua escala tempo de operação.

A configuração mais utilizada para o controle hierárquico segue uma estrutura com três níveis (primário, secundário e terciário). No nível primário com as menores escalas de tempo de atuação (de microssegundos à milissegundos), estão incluídos os controles de corrente e de tensão da saída do VSI e o controle do compartilhamento de potência (GUERRERO; VASQUEZ; MATAS, 2011; AHMEDZODZIC et al., 2021). O segundo nível de controle possui uma resposta mais lenta em comparação ao primeiro e é responsável pela correção dos pequenos desvios de tensão e frequência provenientes do controle primário e por satisfazer os requisitos de qualidade de energia (a correção do desequilíbrio das tensões de fase da microrrede causadas por cargas monofásicas e trifásicas desequilibradas, a compensação de harmônicos de corrente e tensão introduzidos por cargas não lineares e preservação da estabilidade da microrrede na ocorrência de falhas) (AHMETHODZIC; MUSIC, 2021). O controle terciário é o último (e o mais lento) nível de controle que considera as preocupações econômicas na operação ideal da microrrede. No modo conectado é o responsável por gerenciar o fluxo de energia entre a microrrede e a rede principal (ROSINI et al., 2021). Mais informações sobre o controle primário será apresentado nos capítulos seguintes. Os níveis secundário e terciário estão fora do escopo deste trabalho.

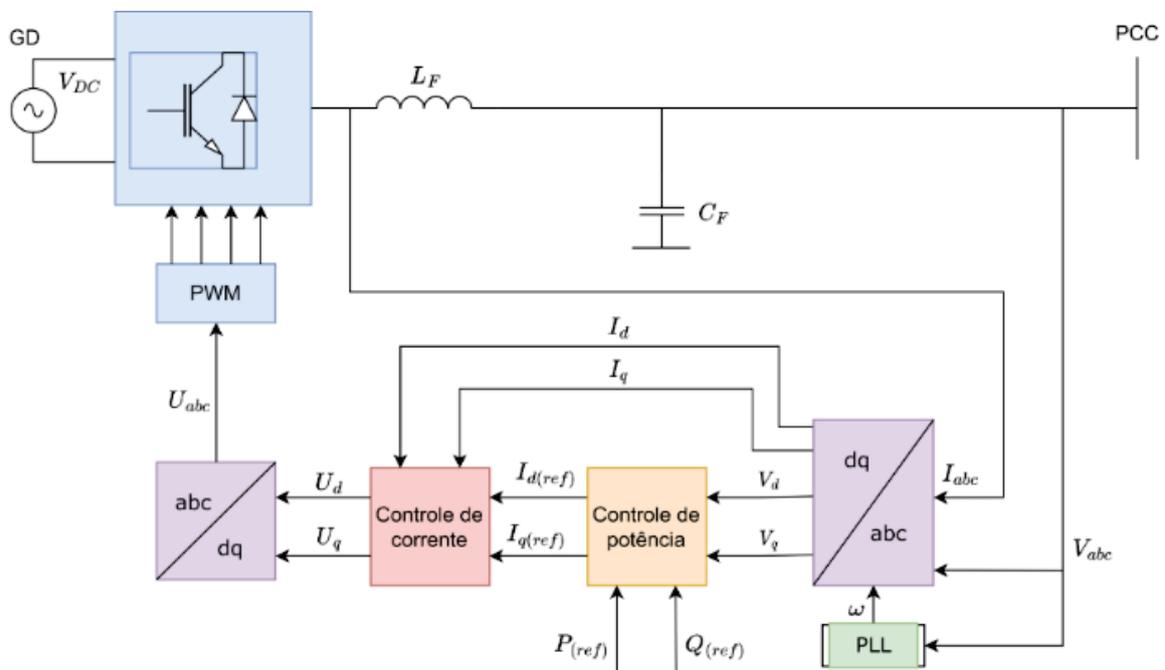
3.3.1 Malhas de controle de tensão e corrente

As malhas de controle de tensão e corrente, referidos em algumas literaturas como o nível zero do controle hierárquico (GUERRERO et al., 2013), são os responsáveis pelo controle da tensão e corrente de saída dos VSIs. As soluções mais utilizadas para a sua implementação em sistemas trifásicos são baseadas em controladores proporcionais integrais (PI) trabalhando em referenciais síncronos dq,

ou na implementação de controladores ressonantes trabalhando em um referencial estacionário $\alpha\beta$ (ROCABERT et al., 2012). A sua implementação pode ser feita a partir de duas configurações que estão relacionados ao modo de operação do VSI (formador de rede ou seguidor de rede).

Os VSIs seguidores de rede são controlados no modo corrente (CCVSI), também denominado de modo PQ. A FIGURA 5 mostra um diagrama do controle de um VSI seguidor de rede com um filtro de saída LC, onde V_{CC} é a tensão CC na entrada do VSI, L_F e C_F são a indutância e a capacitância de filtro. O sistema de controle conta com uma malha de controle de corrente, implementado em sistema referencial síncrono, com um controlador PI, e uma malha de controle de potência. A referência de corrente é determinada de acordo com valores desejados de potência ativa e reativa (RAJESH et al., 2017). Esse modo de controle, normalmente, opera com uma malha de sincronização, usualmente um PLL (Phase locked loop), responsável por coletar os valores relativos de amplitude ângulo de fase e a frequência da tensão da rede (GOLESTAN; GUERRERO; VASQUEZ, 2017).

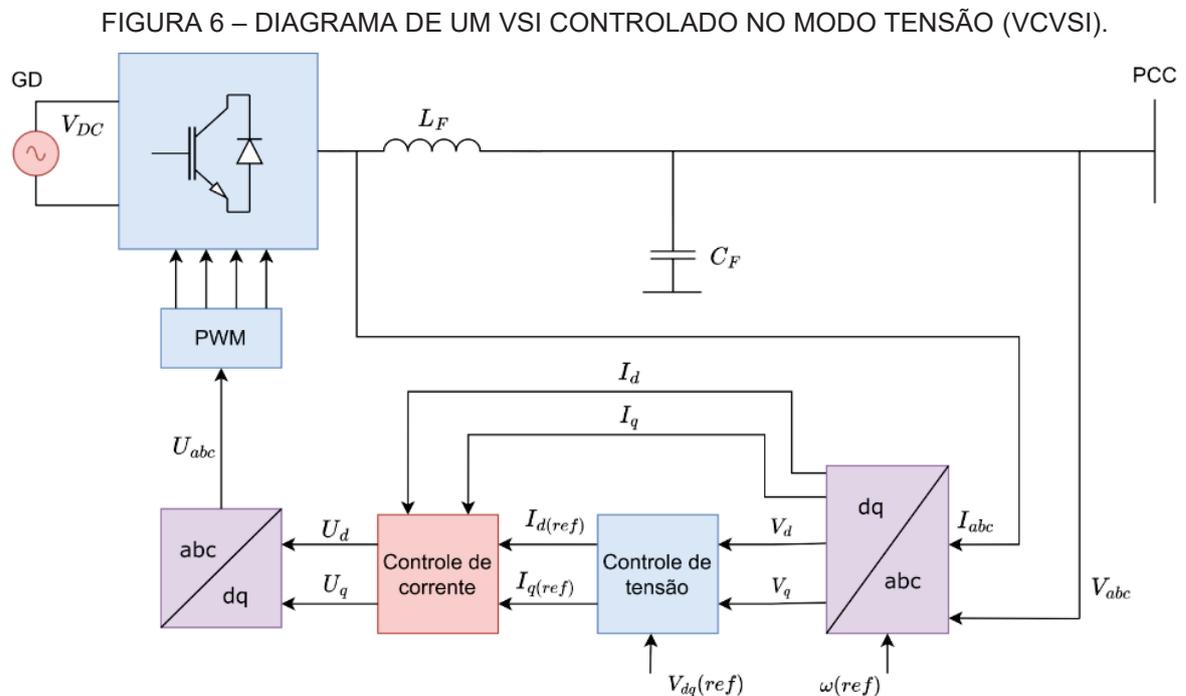
FIGURA 5 – DIAGRAMA DE CONTROLE DE UM VSI CONTROLADO NO MODO CORRENTE (CCVSI).



FONTE: Adaptado de Rajesh et al. (2017).

Inversores formadores de rede são controlados no modo tensão (VCVSI), também denominado de modo V-f. A FIGURA 6 mostra um diagrama de controle de

um VSI controlado no modo tensão. O controle consiste em um sistema em cascata com uma malha de controle de corrente e uma malha externa para o controle de tensão. Na malha de controle de tensão, o erro entre a referência e a tensão medida é a entrada para o controlador PI cuja saída estabelece a referência de corrente para a malha interna de corrente. A malha de tensão recebe a tensão medida dos capacitores do filtro e compara com a referência, o erro entre a referência e a tensão medida é a entrada para o controlador PI, cuja saída estabelece a referência de corrente para a malha interna de corrente. Isso permite manter a tensão no PCC nos valores de referência estabelecidos (ROCABERT et al., 2012; ALFERGANI et al., 2018).



FONTE: Adaptado de Rajesh et al. (2017).

3.3.2 Mecanismo de Sincronização

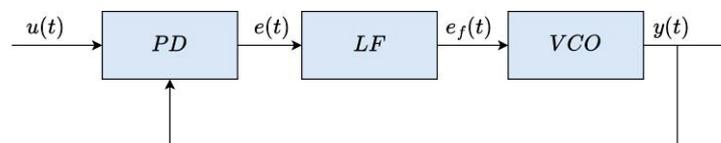
Como apresentado anteriormente, os CVCVSI funcionam como inversores seguidores de rede, por isso, necessitam de um mecanismo de sincronização para garantir que operem de acordo com os requisitos da microrrede.

A unidade de sincronização desempenha a função de extrair as informações (tensão, frequência e ângulo de potência) da rede, que são posteriormente utilizadas

nas malhas de controle, pois são necessários para conduzir um controle preciso da potência ativa e reativa entregue à rede. Em geral, usa-se um (*phase-locked-loop*) PLL para a sincronização com a rede (ALI et al., 2018).

O mecanismo de funcionamento do PLL consiste em eliminar a diferença de fase entre o sinal de entrada (vetor de tensão) e o sinal gerado na sua saída. A sua arquitetura básica é mostrada na FIGURA 7. A estrutura consiste em um detector de fase (*phase detector* - PD), um filtro passa baixa (*low pass filter* - LF) e um oscilador controlado por tensão (*Voltage Controlled Oscillator* - VCO). O PD mede a diferença entre a saída $y(t)$ e o sinal de entrada $u(t)$ e gera o sinal de erro de fase $e(t)$, composto por termos de alta e baixa frequência. O $e(t)$ passa pelo LF onde os termos de alta frequência são suprimidos. O LF é o principal responsável pelas características de rastreamento, a resposta dinâmica e a estabilidade do PLL. O sinal de saída LF $e_f(t)$ passa pelo VCO, que aumenta ou diminui o sinal $e_f(t)$ até que seja igual ao sinal da entrada ($y(t) = u(t)$ (condição de bloqueio)) (KULKARNI; GAONKAR, 2023).

FIGURA 7 – ESTRUTURA BÁSICA DE UM PLL (*PHASE LOCKED LOOP*)



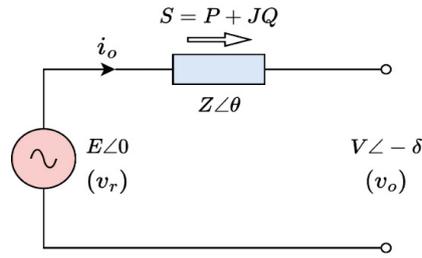
FONTE: Adaptado de Kulkarni e Gaonkar (2021).

3.3.3 Controle Droop

A ideia de utilizar controle de droop para inversores vem do controle dos geradores síncronos no sistema de energia convencional. Com o controle droop, o compartilhamento de potência real e reativa entre inversores pode ser alcançado controlando duas variáveis independentes – a frequência e a magnitude da tensão fundamental do inversor.

A seguir é apresentada a derivação do controle droop a partir da análise do fluxo de potência em um VSI conectado a um barramento CA (FIGURA 8) (CHANDORKAR; DIVAN; ADAPA, 1993; DE BRABANDERE et al., 2007; MOHAMMED et al., 2023; ROKROK; GOLSHAN, 2010; ZHONG; ZENG, 2016).

FIGURA 8 – MODELO DE UM VSI CONECTADO A UM BARRAMENTO CA



FONTE: O autor (2024).

Um inversor pode ser modelado como uma fonte de tensão v_r em série com a impedância de saída Z , conforme mostrado na FIGURA 8. Onde E é a amplitude (ou valor RMS) da tensão da fonte e δ , chamado de ângulo de potência, é a diferença de fase entre \bar{E} e \bar{V} . A potência aparente entregue pela fonte \bar{E} ao terminal \bar{V} é dada pela equação (1).

$$\bar{S} = P + jQ = \bar{E}\bar{I}^* = \bar{E} \left(\frac{\bar{E} - \bar{V}}{Z} \right)^* = E \left(\frac{E - Ve^{-j\delta}}{Ze^{j\theta}} \right)^* \quad (1)$$

$$S = E \left(\frac{E - Ve^{j\delta}}{Ze^{-j\theta}} \right) = \frac{E^2 e^{j\theta}}{Z} - \frac{EV e^{j(\delta+\theta)}}{Z} \quad (2)$$

Usando a fórmula de Euler para separar a potência aparente em seus componentes real e imaginário, obtém-se a potência ativa e a potência reativa entregues pela fonte (equações 3 e 4).

$$P = \frac{E^2}{Z} \cos\theta - \frac{EV}{Z} \cos(\delta + \theta) \quad (3)$$

$$Q = \frac{E^2}{Z} \sin\theta - \frac{EV}{Z} \sin(\delta + \theta) \quad (4)$$

Com $Ze^{j\theta} = R + jX$, as equações (3) e (4) podem ser reescritas como

$$P = \frac{E}{(R^2 + X^2)} [R(E - V \cos \delta) + XV \sin \delta] \quad (5)$$

$$Q = \frac{E}{(R^2 + X^2)} [X(E - V \cos \delta) - RV \sin \delta] \quad (6)$$

Considerando a impedância $Z \angle \theta$ como uma impedância altamente indutiva, ou seja, $X \gg R$, o R pode ser desprezado (ROKROK; SHAFIE-KHAH; CATALÃO, 2018). Assim, as equações (5) e (6) podem ser reescritas como

$$P = \frac{EV \sin \delta}{X} \quad (7)$$

$$Q = \frac{E^2 - EV \cos \delta}{X} \quad (8)$$

Se o ângulo δ for um valor muito pequeno, é válido considerar $\sin \delta \approx \delta$ e $\cos \delta \approx 1$. As equações (7) e (8) podem, então, ser reduzidas a

$$P \approx \frac{EV \delta}{X} \Rightarrow \delta \approx \frac{PX}{EV} \quad (9)$$

$$Q \approx \frac{E(E - V)}{X} \Rightarrow E - V = \frac{QX}{E} \quad (10)$$

As equações (9) e (10) mostram que, para um valor pequeno de ângulo de potência (δ) e uma impedância altamente indutiva ($X \gg R$), a potência ativa é proporcional ao ângulo de potência ($P \propto \delta$) e a potência reativa é proporcional à magnitude da tensão ($Q \propto V$). A partir da relação entre a frequência e o ângulo de potência, é possível, com o controle de P , regular o valor de frequência, e com o controle de Q , regular a amplitude da tensão da rede. As equações (11) e (12) apresentam as relações P_ω e Q_V do controle droop.

$$\omega = \omega^* - k_p P \quad (11)$$

$$V = V^* - k_q Q \quad (12)$$

Onde, ω^* e V^* são os valores nominais de frequência e da amplitude (ou valor RMS) da tensão, respectivamente; P e Q são valores medidos de potência ativa e reativa; k_p e k_q são constantes denominados de coeficientes droop, são determinados a partir dos limites aceitáveis de desvio de frequência (ω_{max} , ω_{min}) e de tensão (E_{max} , E_{min}) na rede, como mostram as equações (13) e (14):

$$k_p = \frac{\omega^* - \omega_{min}}{P_{max} - P} \quad (13)$$

$$k_q = \frac{E^* - E_{min}}{Q_{max} - Q} \quad (14)$$

Na FIGURA 9 (a) é mostrada a relação entre a potência ativa, a frequência e a inclinação da curva k_p . Um aumento na demanda da potência ativa resulta em diminuição da frequência e vice-versa. Os coeficientes k_q são calculados para cada VSI conectado na rede CA de modo que cada DER entregue uma potência proporcional à sua capacidade. O mesmo ocorre com a relação entre a potência reativa e a tensão, como ilustrado na FIGURA 9 (b). Isso possibilita o compartilhamento de potência de diversos VSIs sem que uma receba informações sobre o estado de operação dos outros.

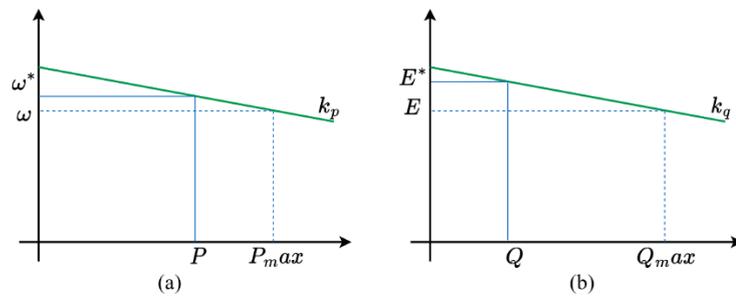
Para a aplicação do controle droop reverso em um CCVSI a equação (11) é reescrita em função da potência ativa e a (12), em função da potência reativa, resultando em:

$$P = \frac{1}{k_p} (\omega^* - \omega) \quad (15)$$

$$Q = \frac{1}{k_q} (E^* - E) \quad (16)$$

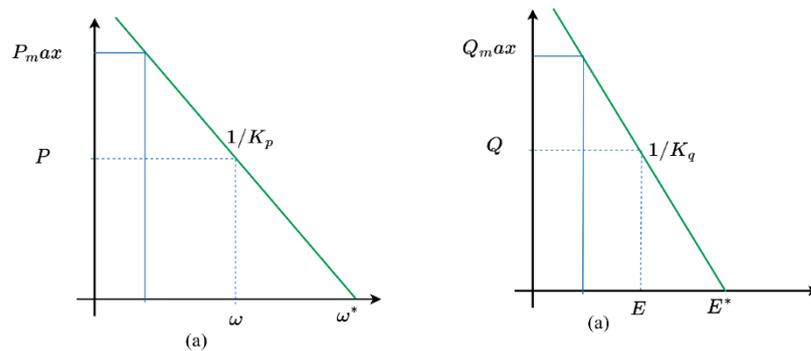
Onde ω^* e E^* são a frequência medida e a amplitude de tensão do barramento. A FIGURA 10 mostra a relação $P - \omega$ e $Q - f$ do controle droop aplicado em um VSI controlado no modo controle de corrente.

FIGURA 9 – CURVAS DO CONTROLE DROOP TENSÃO E FREQUÊNCIA.



FONTE: Adaptado de Whu et al. (2014).

FIGURA 10 – CURVAS DO CONTROLE DROOP DA TENSÃO COM O CONTROLE DROOP.



FONTE: Adaptado de Wu et al. (2014).

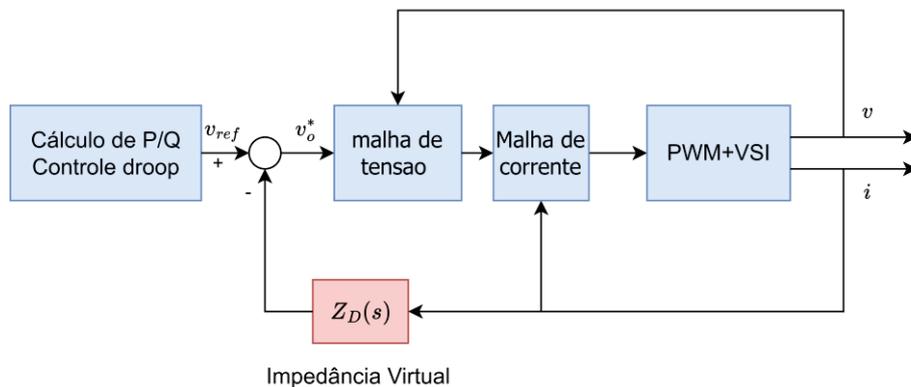
3.3.4 Impedância Virtual

O método de controle droop, apresentado na seção anterior, foi desenvolvido assumindo uma impedância da linha com um alto componente indutivo, assim, a resistência da linha pode ser desprezada. Contudo, isso nem sempre ocorre, as impedâncias de linha em aplicações de baixa tensão, por exemplo, possuem um componente resistivo maior, conseqüentemente, o método de controle droop convencional está sujeito a um desempenho fraco devido ao acoplamento de potência ativa e reativa. Além disso, diferenças nas impedâncias de VSIs conectados em paralelo afetam significativamente a precisão do compartilhamento de potência reativa devido às quedas desiguais de tensão (LI; KAO, 2009).

Uma possível solução para esse problema consiste em adicionar um indutor em série na saída do inversor, de modo a aumentar o componente indutivo da impedância de saída. Porém, isso pode aumentar o tamanho e o custo do equipamento. Uma abordagem mais eficaz pode ser a introdução de uma impedância virtual, que consiste em adaptar a malha de controle do conversor de potência para produzir o efeito de uma impedância na saída do VSI (GUERRERO et al., 2013; ROCABERT et al., 2012).

A FIGURA 11 ilustra a operação de uma malha de impedância virtual em um VSI controlado por tensão. Sendo o Z_D um controlador proporcional derivativo que emula o efeito de uma impedância.

FIGURA 11 – DIAGRAMA DE BLOCOS DO SISTEMA DE CONTROLE COM UMA MALHA DE IMPEDÂNCIA VIRTUAL



FONTE: Adaptado de Tembo (2016).

No esquema, a tensão de referência é obtida da seguinte forma:

$$v_{ref} = v_o - Z_D(s).i \quad (17)$$

e

$$Z_D(s) = R + sLv \quad (18)$$

Em que, $Z_D(s)$ é a impedância virtual, o v_o é a referência de tensão de saída em condição sem carga, definida como $v_o = E \sin(\omega t)$, R é a resistência virtual e o Lv é a reatância virtual.

Para a dissociação dos fluxos de potência ativa e reativa e o melhor compartilhamento de potência reativa em VSIs, pode-se utilizar uma resistência negativa virtual ou indutância virtual (WANG et al., 2015).

Normalmente, a impedância virtual Z_D é projetada para ser maior que a impedância de saída do inversor e a impedância de linha. A impedância de saída virtual Z_D é equivalente às impedâncias séries do gerador síncrono. No entanto, a impedância em séries de um gerador síncrono é principalmente indutiva, por outro lado a impedância virtual pode ser escolhida arbitrariamente. Além disso, a impedância virtual não apresenta perdas de potência (GUERRERO et al., 2013).

Ao moldar a impedância de saída de controle, a impedância virtual pode ser usada, não apenas para reduzir o acoplamento entre os fluxos de potência ativa e reativa nas redes de distribuição de baixa tensão, mas também para melhorar o desempenho dinâmico do sistema de controle durante transitórios (WANG et al., 2015).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta o ambiente do desenvolvimento do trabalho e as etapas da implementação das estratégias de controle da microrrede. São apresentadas a arquitetura da microrrede, os equipamentos, os métodos utilizados e as configurações abordadas para o compartilhamento de potência na microrrede ilhada.

4.1 ESTRUTURA DO LABORATÓRIO DE MICRORREDES

O estudo foi realizado no laboratório de microrredes do Departamento de Engenharia Elétrica (DELT) da Universidade Federal do Paraná (FIGURA 12). A FIGURA 13 mostra a configuração da microrrede operando no modo ilhado. O sistema conta com dois inversores bidirecionais de 25 kVA da marca TrueConvert AC 3025 conectados ao barramento da microrrede (de 400 V).

FIGURA 12 – LABORATÓRIO DE MICRORREDES DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA (DELT) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ.

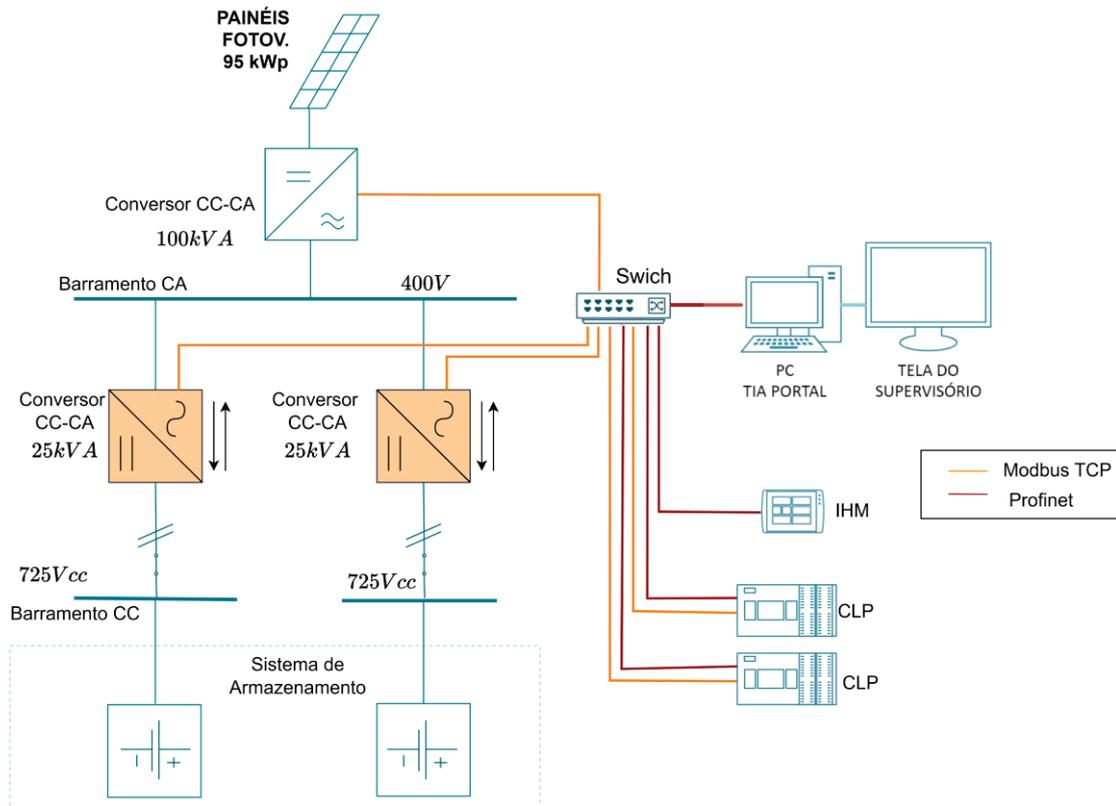


FONTE: O autor (2024).

Além dos inversores bidirecionais, está conectado à microrrede um inversor solar fotovoltaico de 100 kVA, alimentado por um sistema fotovoltaico com uma capacidade instalada de 95 kW. O dispositivo é um inversor da marca ABB, modelo PVS-100 TL. Uma de suas características é a possibilidade de controlar a potência reativa, ou seja, o inversor é capaz de operar com um fator de potência igual a zero, fornecendo/absorvendo apenas a potência reativa.

Um sistema de armazenamento é conectado ao barramento CC de (725 V). O sistema de armazenamento consiste em um banco de baterias de íons de lítio com uma capacidade de 40 Ah e tensão nominal de 475 V.

FIGURA 13 – CONFIGURAÇÃO DA MICRORREDE EM ESTUDO



FONTE: O autor (2023).

Para o comissionamento e o controle desses equipamentos foram utilizados controladores lógicos programáveis (CLPs) da Siemens, série SIMATIC S7-1500, uma interface homem máquina (IHM) e um computador equipado com o software Tia Portal da Siemens. A comunicação entre o CLP e os demais equipamentos é estabelecida através dos protocolos de comunicação profinet e modbus TCP.

Por questões de disponibilidade de equipamentos, não foi possível adicionar cargas na microrrede. A configuração, portanto, conta com o inversor fotovoltaico para a alimentação da microrrede, enquanto os inversores bidirecionais direcionam a energia para o sistema de armazenamento. A potência de saída do inversor fotovoltaico foi limitada abaixo da capacidade da geração disponível, o seu valor foi variado, incrementando ou decrementando degraus de potência, e foram analisadas as respostas dos inversores bidirecionais para essas variações. Só foi possível estudar o compartilhamento de potência ativa com o fluxo de energia em um sentido (do sistema fotovoltaico para o sistema de armazenamento). Para a potência reativa, uma vez que o inversor fotovoltaico é capaz de fornecer e absorver a potência reativa, foi possível estudar o compartilhamento de potência reativa nos dois sentidos.

4.1.1 Controlador Lógico Programável Simatic S7-1515-2 Pn

No presente trabalho, foi utilizado o CLP do fabricante SIEMENS, série SIMATIC S7-1500. O CLP utilizado tem como principais componentes uma fonte de alimentação, a unidade central de processamento (*Central Processing Unit - CPU*), um módulo de entrada digital e um módulo de saída digital, como pode ser visto na FIGURA 14. O QUADRO 5 apresenta as especificações técnicas do CLP.

FIGURA 14 – CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMÁVEL S7 – 1500 COM O CPU 1515-2 PN E OS MÓDULOS DE ENTRADA E SAÍDA.



FONTE: O autor (2024).

QUADRO 5 – INFORMAÇÕES TÉCNICAS DO CLP SIMATIC S7-1515-2 PN

MÓDULO	MODELO	CARACTERÍSTICAS GERAIS
CPU	6ES7 515-2 AM01-0AB0	CPU com display; memória de trabalho de 500 kB; memória de dados de 5 MB
FONTE	6ES7 507-0RA00-0AB0	Potência de entrada digital DI 16x24 V CC/1A HF
ENTRADA DIGITAL	6ES7 521-1BH00-0AB0	Modulo de entrada digital DI 16x24 V CC/1A HF
		16 entradas digitais
		2 entradas com operação de contadores
		Atraso de entrada 0,05 ms até 20 ms
SAÍDA DIGITAL	6ES7 522-1BF00-0AB0	Módulo de saída digital DQ 8x24 V CC/2A HF
		8 saídas digitais
		2 canais para modulação de largura de pulso (PWM)

FONTE: Siemens (2024).

4.1.2 Interface Homem Máquina

Para interagir com os inversores (enviar informações e comandos de controle e realizar leituras dos parâmetros de operação) é necessário um intermediário entre o operador e o dispositivo. Uma IHM (Interface Homem-Máquina) é uma interface destinado a comunicar o CLP com o usuário. A FIGURA 15 apresenta a tela da IHM da fabricante SIEMENS utilizada no trabalho.

FIGURA 15 – INTERFACE HOMEM MÁQUINA (IHM)



FONTE: O Autor (2024).

4.1.3 Conversor Bidirecional Trueconvert Ac 3025.

O truConvert AC 3025 (FIGURA 16) é um inversor trifásico modular da fabricante TRUMPF Hüttinger. O dispositivo é bidirecional, ou seja, pode ser utilizado para alimentar a rede com a energia do barramento CC ou funcionar como um retificador permitindo carregar um barramento CC a partir de uma rede trifásica.

FIGURA 16 – INVERSOR BIDIRECIONAL TRU CONVERT AC 3025



FONTE: Trumpf (2024).

A operação e o controle do equipamento podem ser realizados a partir de um computador pela interface Web ou pelo protocolo de comunicação Modbus. Os QUADROS 6 e 7 mostram as especificações técnicas do inversor.

QUADRO 6 – INFORMAÇÕES TÉCNICAS DO INVERSOR TRU CONVERT AC 3025 (LADO CA)

Descrição	Valor
Eficiência máxima	98%
Tensão de alimentação do inversor	24 VDC \pm 10 % / 8 A
Faixa de tensão de linha da rede	380 V -10 % ... 480 V +10 %
Tensão nominal a 60 Hz (Operação ilhada)	231 V
Faixa de frequência da rede elétrica	45 Hz to 65 Hz
Frequência nominal da rede elétrica	50 Hz / 60 Hz
Potência nominal de Carga e Descarga	25 Kva
Capacidade de sobrecarga 125% (10 min)	32 kVA1
Capacidade de sobrecarga 150% (1 min)	37.5 kVA1
Corrente nominal para tensão listada	380 V: 38 A 400 V: 37 A 415 V: 35 A 440 V: 33 A 460 V: 32 A 480 V: 31 A

FONTE: Trumpf (2024).

QUADRO 7 – INFORMAÇÕES TÉCNICAS DO INVERSOR TRUCONVERT AC 3025 (LADO CC)

Descrição	Valor
Corrente do barramento CC em:	750 V: 36 A 800 V: 33 A 850 V: 31 A 900 V: 30 A 950 V: 28 A
Tensão máxima do lado CC:	950 VDC

FONTE: Trumpf (2024).

O inversor opera como um CCVSI, conectado a uma rede, ou como um VCVSI, formando uma rede. No segundo caso, o inversor conta com um controle droop interno e uma impedância virtual, que possibilitam a conexão em paralelo de vários dispositivos sem a necessidade de comunicarem entre si. Assim, o inversor pode formar uma microrrede ilhada e pode operar em paralelo com outros inversores formadores de rede.

Para a operação ilhada, é necessário configurar os parâmetros do controle droop. A malha de controle droop de frequência de operação do inversor (f) pode ser descrita pela equação (19).

$$f = f_{lin} + kp \times (P_{set} - P_{act}) \quad (19)$$

Onde, f_{lin} representa a frequência de linearização (frequência de referência); kp , o coeficiente droop de frequência; P_{set} , um valor definido de potência ativa; P_{act} , valor de potência fornecida ou consumida pelo inversor.

Para a regulação da tensão, a malha de controle é descrita pela equação (20)

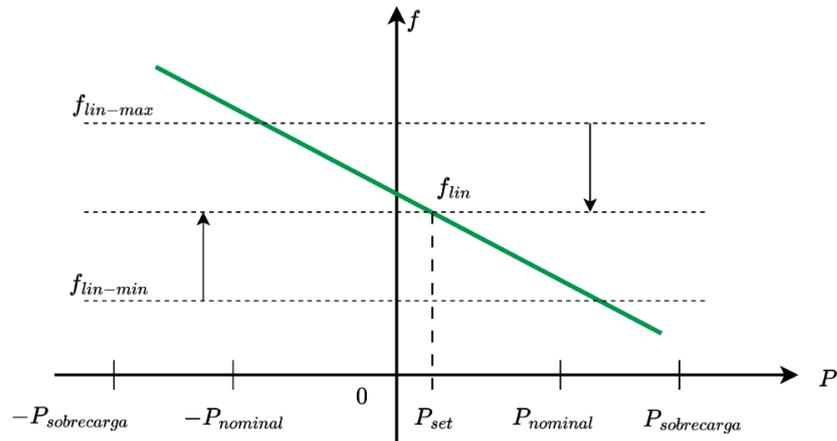
$$V = V_{lin} + kq \times (Q_{set} - Q_{act}) \quad (20)$$

Onde, V_{lin} representa os valores de Tensão de linearização (tensão de referência); kq , o coeficiente droop de tensão; Q_{set} , um valor definido de potência reativa; Q_{act} representa a potência reativa fornecida ou consumida pelo inversor. A FIGURA 17 mostra as curvas do controla droop de frequência e de tensão do inversor.

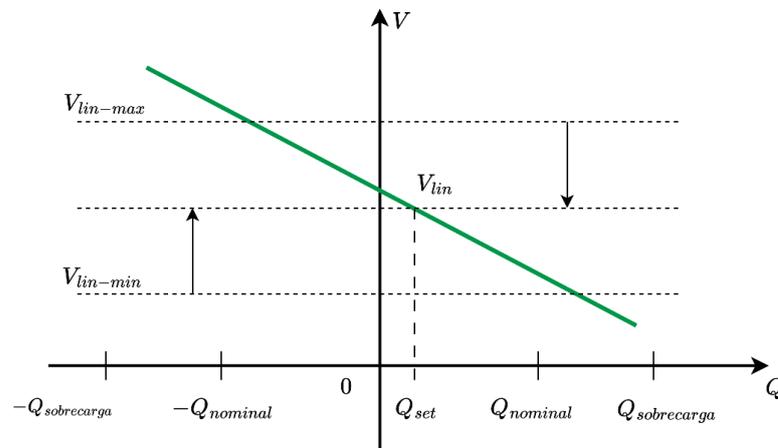
A partir da frequência de linearização (f_{lin}), é estabelecida a frequência de referência para a operação ilhada, podendo variar dos intervalos de 55 a 65 Hz. Para evitar desvios indesejavelmente grandes dos pontos de linearização dos valores nominais de frequência, limites mínimos ($f_{lin-min}$) e máximos ($f_{lin-max}$) dos pontos de

linearização de frequência são introduzidos, como mostrado na FIGURA 17 (a). Podem variar de 54 a 66 Hz.

FIGURA 17 – CURVA DE CONTROLE DROOP DE FREQUÊNCIA (A) E DE TENSÃO (B) DO INVERSOR BIDIRECIONAL



(a)



(b)

FONTE: Adaptado de Trumpf (2024).

A partir do fator de ajuste de tensão (V_{lin}), é estabelecida a tensão de referência para a operação ilhada, com um intervalo de 75 a 120% da potência nominal. Para evitar desvios indesejavelmente grandes dos pontos de linearização dos valores nominais de tensão, limites mínimos ($V_{lin-min}$) e máximos ($V_{lin-max}$) dos pontos de linearização de frequência são introduzidos, como mostrado na FIGURA 17 (b). Podem variar de 173 V a 277 V de tensão de fase.

O valor do coeficiente droop de frequência k_p é calculado a partir da razão entre a frequência nominal (f_N) e a potência nominal (P_N) (equação 21), e o valor de coeficiente droop de tensão é calculado a partir da razão entre a tensão nominal (V_N) e a potência reativa nominal (Q_N) (equação 22). Os valores nominais são os valores pelo qual o inversor foi projetado para operar. A frequência nominal de operação é de 60 Hz. Para essa frequência, a tensão de fase nominal do inversor no modo ilhado é de 231 V. O valor nominal da potência ativa e da potência reativa são de 25 kW e 25 kvar, respectivamente.

$$k_p = Droop_{kp} \times (f_N/P_N) \quad (21)$$

$$k_q = Droop_{kq} \times (V_N/Q_N) \quad (22)$$

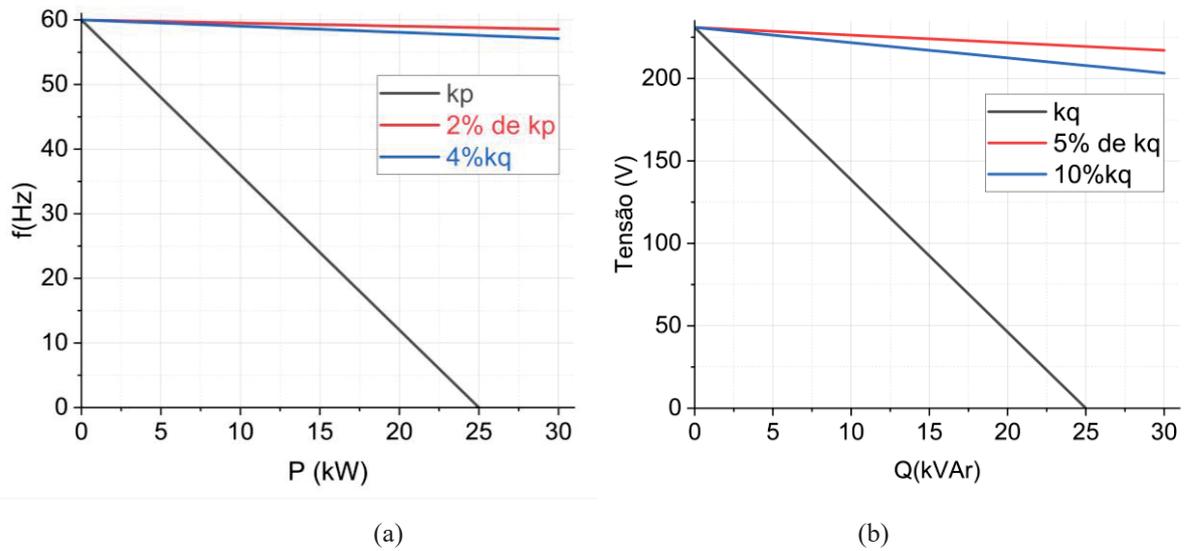
Onde, $Droop_{kp}$ e $Droop_{kq}$ são os parâmetros do coeficiente droop configuráveis no inversor. $Droop_{kp}$ é dado em termos de percentual de k_p , sendo 0,1% o valor mínimo e 4% o valor máximo a ser introduzido. Similarmente, $Droop_{kq}$ é dado em termos de percentual de k_q , sendo 0,1% o seu valor mínimo e 10% o seu valor máximo. A FIGURA 18 mostra a curva do controle droop com diferentes valores de $Droop_{kp}$ e $Droop_{kq}$.

Considerando o sentido do fluxo de potência, o inversor opera em dois modos: Produtor e consumidor. O modo de operação selecionado determina a convenção dos sinais da potência ativa.

No modo de operação produtor, sinal positivo de potência ativa significa que a energia flui do lado CC em direção à rede elétrica. Sinal negativo significa que a energia flui da rede elétrica em direção ao barramento CC. Como mostrado na FIGURA 19.

Para a potência reativa, o fator de potência é capacitivo quando a potência reativa for maior que zero (o inversor fornece potência reativa) e indutivo quando a potência reativa for menor que zero (o inversor absorve potência reativa).

FIGURA 18 – CURVA DO COEFICIENTE DROOP DE FREQUÊNCIA (a) E TENSÃO (b) (DIFERENTES VALORES DE Droopkp E Droopkq)



FONTE: O autor (2024).

FIGURA 19 – CONVENÇÃO DE SINAIS DE POTÊNCIA PARA O INVERSOR OPERANDO COMO PRODUTOR



FONTE: Adaptado de Trumpf (2024).

4.2 COMISSIONAMENTO E CONFIGURAÇÃO DA MICRORREDE

O comissionamento dos inversores bidirecionais foi feito por meio do CLP e uma IHM, a partir do software Tia Portal. A escrita e leitura dos dados é feita por meio dos registros modbus disponíveis no manual do inversor. Cada variável a ser lida ou

escrita possui um registro modbus que é configurada na entrada (MB_DATA_ADDR) do bloco de comunicação modbus, como ilustrado no apêndice 1. O Tia-Portal permite estabelecer um link entre os registros e a IHM para permitir a escrita e a leitura dos dados.

Para controlar a potência fornecida pelo inversor fotovoltaico (PV-VSI), foi escrito no CLP um programa que permite limitar a potência ativa e reativa fornecidas. O programa permite o controle da potência ativa entregue pelo PV-VSI à microrrede, e impede valores muito elevados de energia de serem sejam entregues na microrrede.

Quanto ao estudo do compartilhamento de potência entre os dois VSIs, duas abordagens foram propostas, o compartilhamento de potência entre dois VCVSIs e o compartilhamento de potência entre um VCVSI e um CCVSI. O inversor bidirecional possui a capacidade de operar como um VCVSI e um CCVSI. No primeiro caso o inversor conta com um controle droop nativo e uma impedância virtual, assim, os parâmetros de operação do controle droop são configurados a partir do IHM antes do inversor entrar em operação. Os registradores desses parâmetros utilizados para comunicação modbus estão disponíveis no apêndice 2. No segundo caso, um controle droop reverso externo foi projetado no CLP para permitir o inversor operar como um CCVSI de suporte à rede.

4.3 IMPLIMENTAÇÃO DO CONTROLE DROOP REVERSO

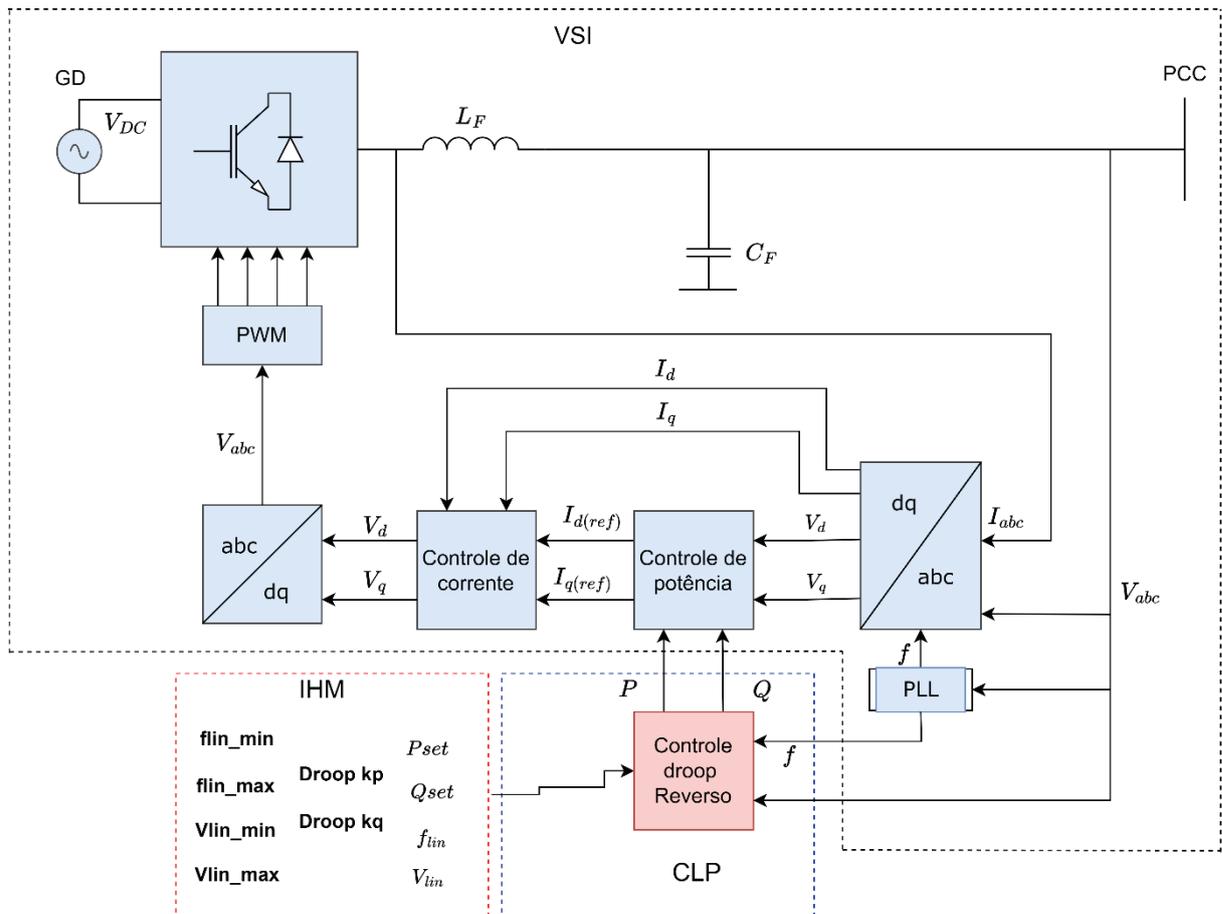
O controle droop reverso para a frequência e tensão seguem as equações,

$$P_{act} = P_{set} + \left(\frac{1}{kp}\right)(f_{lin} - f) \quad (23)$$

$$Q_{act} = Q_{set} + \left(\frac{1}{kq}\right)(f_{lin} - f) \quad (24)$$

Os valores do coeficiente droop (kp e kq) são calculados da mesma forma dos coeficientes droop convencional apresentados nas equações (21) e (22). Na FIGURA 20 é mostrado o diagrama do droop reverso implementado em um CLP e uma IHM para controlar um VSI operando como um CCVSI.

FIGURA 20 – DIAGRAMA DE UM CCVSI COM O DROOP REVERSO



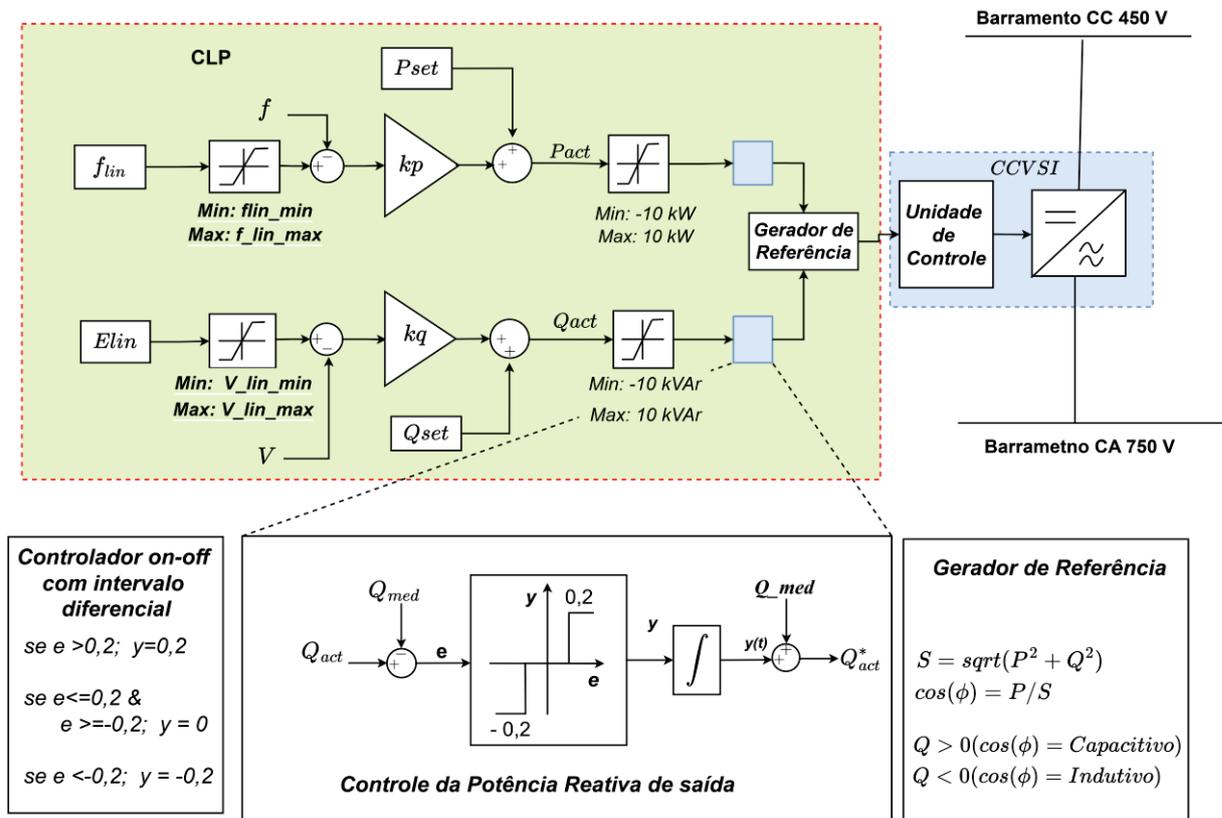
FONTE: O autor (2024).

Na FIGURA 21 é mostrado o diagrama do controle droop reverso implementado no CLP. Os parâmetros f_{lin_min} , f_{lin_max} , V_{lin_min} e V_{lin_max} funcionam como limitadores para não deixar que valores de referência muito altas sejam introduzidas no controle. O valor introduzido é comparado a valores lidos de tensão (V) e frequência (f). O erro é multiplicado ao ganho (k_p e k_q) e adicionado aos valores P_{set} e Q_{set} . Limitadores de potência foram introduzidos para não deixar que valores muito altos de potência sejam enviados para o inversor. O inversor recebe como parâmetros de entrada a potência aparente, o fator de potência. A partir dos valores de potência ativa e da potência reativa, calcula-se a potência aparente e o fator de potência, e é determinado se o fator de potência é indutivo ou capacitivo a partir da do sinal da potência reativa.

A primeiras tentativas de realizar o compartilhamento de potência entre o VCVSI e o CCVSI resultaram em oscilações na tensão e frequência, conseqüentemente, na potência ativa e reativa, o que atrapalhou o compartilhamento

de potência. A solução encontrada envolve a adição de uma malha de controle na saída do controle droop reverso, de modo a introduzir um atraso na sua resposta.

FIGURA 21 – DIAGRAMA DO CONTROLE DROOP REVERSO IMPLEMENTADO NO CLP



FONTE: O autor (2024).

Pela FIGURA 21, é possível observar a atuação da malha de controle implementada. A malha foi adicionada entre o limitador dor potência e o gerador de referência. Os sinais de saída (P_{act} e Q_{act}) são comparados com os valores atuais de operação do inversor, ou seja, valores medidos pelo inversor (P_{med} e Q_{med}). O sinal do erro ($e(t)$) passa por um controlador on-off com um intervalo diferencial. Se o erro for positivo e maior que 0,2, o controlador envia 0,2 para o integrador. Se o erro for negativo e menor -0,2, o controlador envia -0,2 para o integrador. O sinal de saída do integrador se soma ao Q_{med} ou P_{med} antes de ser enviado para o inversor. O valor 0,2 representa uma variação de 200 W/s na saída do inversor.

5 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Este trabalho apresenta um estudo do compartilhamento de potência entre VSIs em uma microrrede ilhada, levando em consideração duas abordagens de controle: (1) compartilhamento de potência entre dois VCVSIs, em que os dois atuam como formadores de rede; e (2) compartilhamento de potência entre um VCVSI e um CCVSI, em que o primeiro forma a rede e o segundo entra como um VSI de suporte à rede.

Para o desenvolvimento e análise dessas abordagens, a microrrede ilhada foi implementada em três configurações diferentes. A primeira configuração não aborda o compartilhamento de potência, mas sim a resposta do controle droop em um cenário em que apenas um VCVSI atua de forma ilhada. A segunda configuração aborda o compartilhamento de potência entre dois VCVSIs com o droop. Por fim, a terceira configuração aborda o compartilhamento de potência entre um VCVSI controlado por droop e um CCVSI controlado por droop reverso. A TABELA 1 apresenta os valores configurados na IHM para a operação ilhada dos inversores TruConvert AC 2035.

TABELA 1 – VALORES CONFIGURADOS PARA O CONTROLE DROOP

Parâmetros	Valores Configurados
F_lin	60 Hz
F_lin_max	65 Hz
F_lin_min	55 Hz
Pset	0 Kw
V_lin	230 V
V_lin_max	249 V
V_lin_min	207 V
Q_set	0 kvar

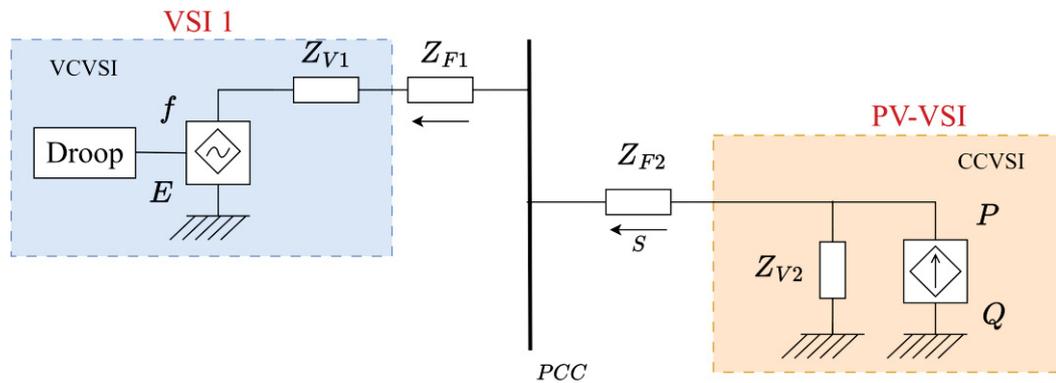
FONTE: O autor (2024).

5.1 CONFIGURAÇÃO 1 – MICRORREDE COM UM INVERSOR FORMADOR DE REDE

A FIGURA 22 mostra a primeira configuração. Nela, o VSI1 (um VCVSI com controle droop) opera como formador de rede. A rede é alimentada pelo PV-VSI (um CCVSI). Z_V e Z_F representam as impedâncias virtual e de filtro, respectivamente. Z_{F1} e Z_{F2} são valores de impedância muito baixos. A impedância de linha foi

desconsiderada, pois não há uma distância considerável entre os VSI e o barramento CA.

FIGURA 22 – CONFIGURAÇÃO 1: MICRORREDE ILHADA COM UM VSI FORMADOR DE REDE



FONTE: O autor (2024).

Para esta configuração, foram realizados quatro ensaios: dois com controle droop P-f e dois com controle droop Q-V. Os valores dos coeficientes droop utilizados nos ensaios estão apresentados na TABELA 2. Os testes foram realizados variando os valores de potência ativa e reativa introduzidos pelo PV-VSI. Todos os resultados obtidos foram fornecidos pelos próprios inversores e armazenados no CLP a partir da comunicação modbus. O Inversor PV-VSI só atualiza os dados de potência no seu registrador a cada 5 s, conseqüentemente, o valor de potência lido aparece com um atraso de 5 s.

TABELA 2 – ENSAIOS REALIZADOS PARA A PRIMEIRA CONFIGURAÇÃO

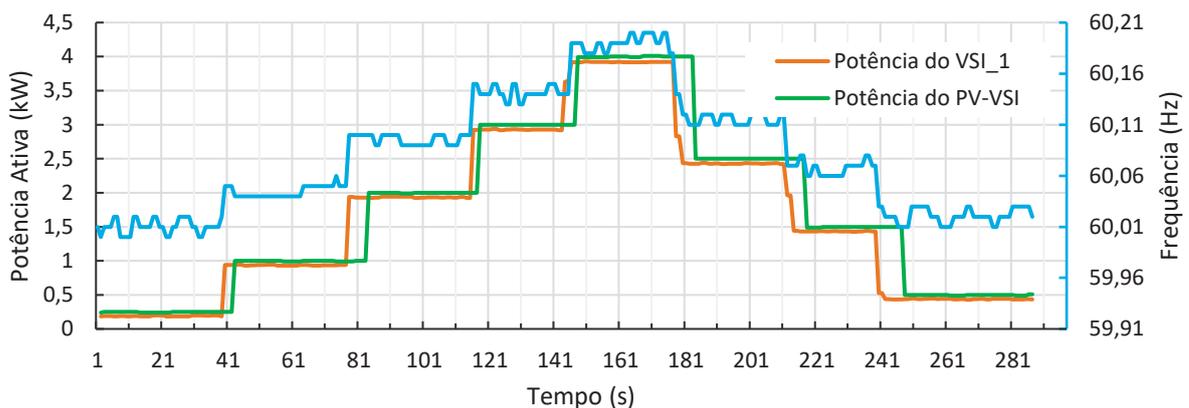
Ensaio	Controle	Porcentual
1	Droop k_p	2%
2	Droop k_p	4%
3	Droop k_q	5%
4	Droop k_q	10%

FONTE: O autor (2024).

O GRÁFICO 1 mostra resultados do primeiro ensaio, com Droop k_p definido em 2%. O gráfico ilustra o comportamento da frequência do PCC e da potência ativa absorvida pelo VSI1 em relação à variação da potência ativa fornecida pelo PV-VSI. No instante inicial, o PV-VSI fornece uma potência ativa de aproximadamente 0,25 kW, que é o valor mínimo entregue pelo inversor fotovoltaico, mesmo quando o valor

configurado é igual a zero. A potência ativa foi elevada de 0 a 4 kW em degraus de 1 kW e, em seguida, reduzida a zero em degraus de 1 e 1,5 kW. Pelo gráfico, pode-se ver que o VSI1 recebe quase toda a energia fornecida pelo PV-VSI, e a frequência aumenta na medida em que eleva a potência absorvida. A pequena diferença nos valores de potência ativa entre os dois VSIs se deve à discrepância nas informações fornecidas pelos equipamentos. Para cada 1 kW de variação na potência ativa, a frequência altera-se em 0,05 Hz. A variação total da potência ativa ocorreu em um intervalo de 3,5 kW, como resposta a frequência variou em um intervalo de 0,17 Hz. Considerando a frequência nominal de 60 Hz e a potência ativa nominal de 25 kW, a relação potência e frequência, calculada pela equação (29), está em conformidade com o valor de Droopkp de 2%.

GRÁFICO 1 – CONTROLE DROOP P-f EM UMA MICRORREDE ILHADA COM APENAS UM VCVSI FORMADOR DE REDE (DroopKp = 2%)



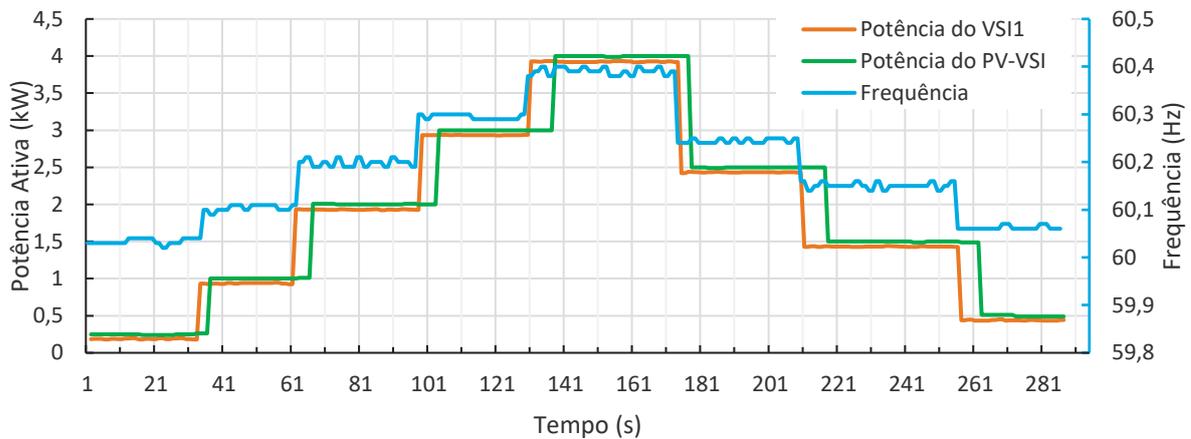
FONTE: O Autor (2024).

Em uma condição de operação na qual o fluxo de energia segue do VSI1 para a carga, a frequência estaria a diminuir enquanto aumenta a potência ativa fornecida. Vale lembrar que, no presente teste, a energia gerada pelo PV-VSI flui para as baterias através do inversor VSI1, por isso há um aumento da frequência da rede.

O GRÁFICO 2 mostra o resultado do segundo ensaio, com Droopkp configurado para 4%. O gráfico apresenta o comportamento da frequência do PCC e da potência ativa absorvida pelo VSI1 em relação à variação da potência ativa fornecida pelo PV-VSI. Durante o ensaio, A potência ativa do PV-VSI foi elevada de 0 a 4 kW em degraus de 1 e 1,5 kW, sendo posteriormente reduzida a 0,5 kW. Para cada 1 kW de variação de potência, a frequência sofreu uma alteração em

aproximadamente 0,1 Hz. Com a variação de 3,4 kW de potência ativa, a frequência apresentou uma alteração de 0,34 Hz, o que representa o dobro da variação observada no primeiro ensaio. Considerando os mesmos valores nominais de frequência e potência, a relação entre a potência ativa e frequência está alinhada com o coeficiente droop de 4%.

GRÁFICO 2 – CONTROLE DROOP P-f EM UMA MICRORREDE ILHADA COM APENAS UM VCVSI FORMADOR DE REDE (DroopKp = 4%)



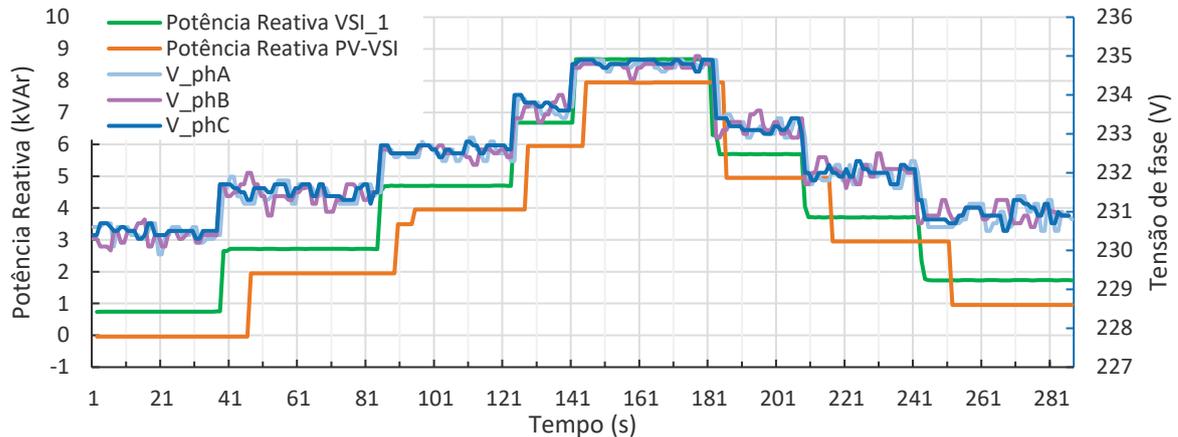
FONTE: O Autor (2024).

O GRÁFICO 3 apresenta os resultados do terceiro ensaio, com o Droopkq igual a 5%. O gráfico apresenta a potência reativa do VSI1, a potência reativa do PV-VSI e os valores eficazes de tensões de fase no PCC. A potência reativa foi elevada de 0 até 8 kvar em degraus de 2 kvar e 3 kvar, sendo posteriormente reduzida a 1 kvar. Em resposta a essa variação, a tensão trifásica aumentou aproximadamente 1 V para cada 2 kvar de potência reativa adicionada. A partir do instante 185 s, iniciou-se a redução da potência reativa, que variou aproximadamente 1 V para 2 kvar de potência reativa. Observa-se que a variação da tensão é proporcional à variação da potência reativa, com a constante de proporcionalidade equivalente a 5% do coeficiente droop.

O GRÁFICO 4 apresenta os resultados do quarto ensaio, com o coeficiente droop de tensão (*Droopkq*) configurado para 10%. O gráfico apresenta a potência reativa do VSI1, a potência reativa do PV-VSI e os valores eficazes de tensões de fase no PCC medidas pelo VSI1. No gráfico, há uma diferença de aproximadamente 1 kvar entre a energia fornecida pelo PV-VSI e a recebida pelo VSI1, isso ocorre porque a medição da potência do PV-VSI acontece antes dos filtros do próprio

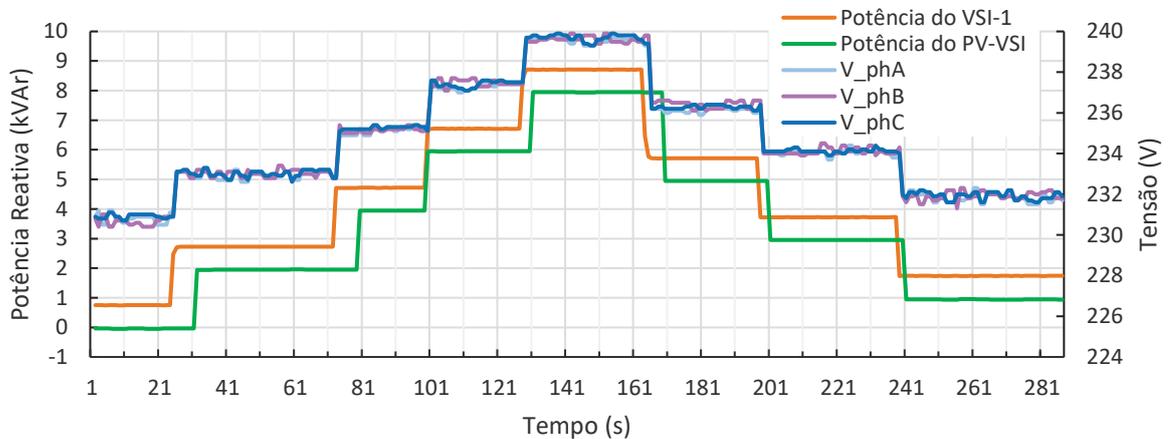
inversor, ou seja, os filtros estão produzindo uma potência reativa capacitiva que não está sendo medida.

GRÁFICO 3 – CONTROLE DROOP Q-V EM UMA MICRORREDE ILHADA COM APENAS UM VCVSI FORMADOR DE REDE (DroopKq = 5%)



FONTE: O Autor (2024).

GRÁFICO 4 – CONTROLE DROOP Q-V EM UMA MICRORREDE ILHADA COM APENAS UM VCVSI FORMADOR DE REDE (DroopKq = 10%)



FONTE: O Autor (2024).

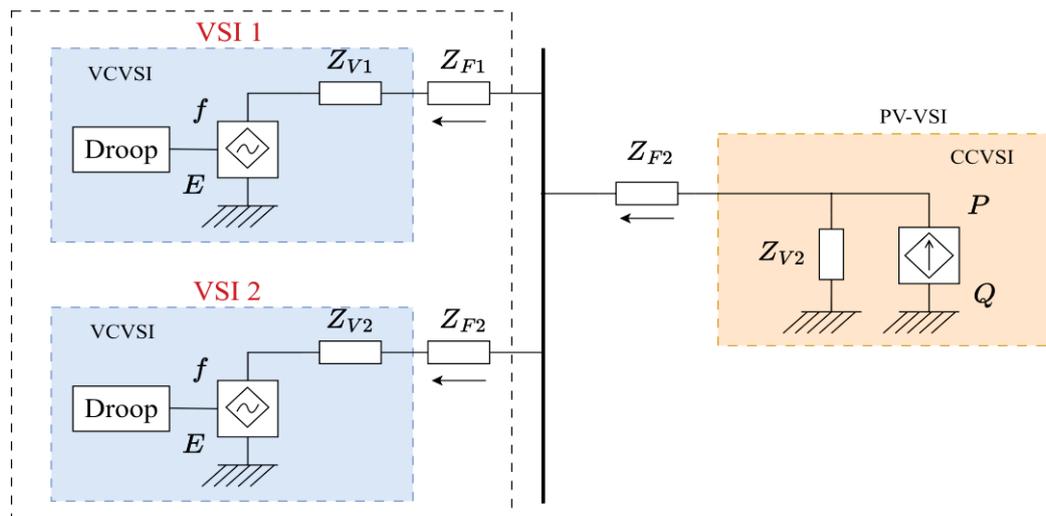
Durante o ensaio, a potência reativa foi elevada de 0 a 8 kvar em degraus de 2 kvar, sendo posteriormente reduzida a 1 kvar. Como resultado, houve uma variação de 8 V na tensão por fase. Considerando um valor de 231 V de tensão nominal e 25 kvar de potência reativa nominal, a relação entre a potência reativa e a tensão, representadas pela equação (20), está em conformidade com um coeficiente droop de 10%.

Similarmente ao controle droop P-f, aqui a tensão aumenta ao invés de diminuir porque o VSI formador de rede opera como consumidor, ou seja a energia flui do PV-VSI para o sistema de armazenamento.

5.2 CONFIGURAÇÃO 2 – MICRORREDE COM DOIS INVERSORES FORMADORES DE REDE

A FIGURA 23 mostra a segunda configuração, na qual dois VCVSIs (VSI1 e VSI2) compartilham potência em uma microrrede ilhada, alimentada por um CCVSI (PV-VSI). Os ensaios nesta configuração foram realizados para analisar a resposta do controle droop no compartilhamento de potência entre os dois VCVSIs. Foram conduzidos seis ensaios, utilizando diferentes valores de Droopkp e Drookq, conforme mostra o A TABELA 3.

FIGURA 23 – MICRORREDE ILHADA COM DOIS VCVSIS COMO FORMADORES DE REDE



FONTE: O autor (2024).

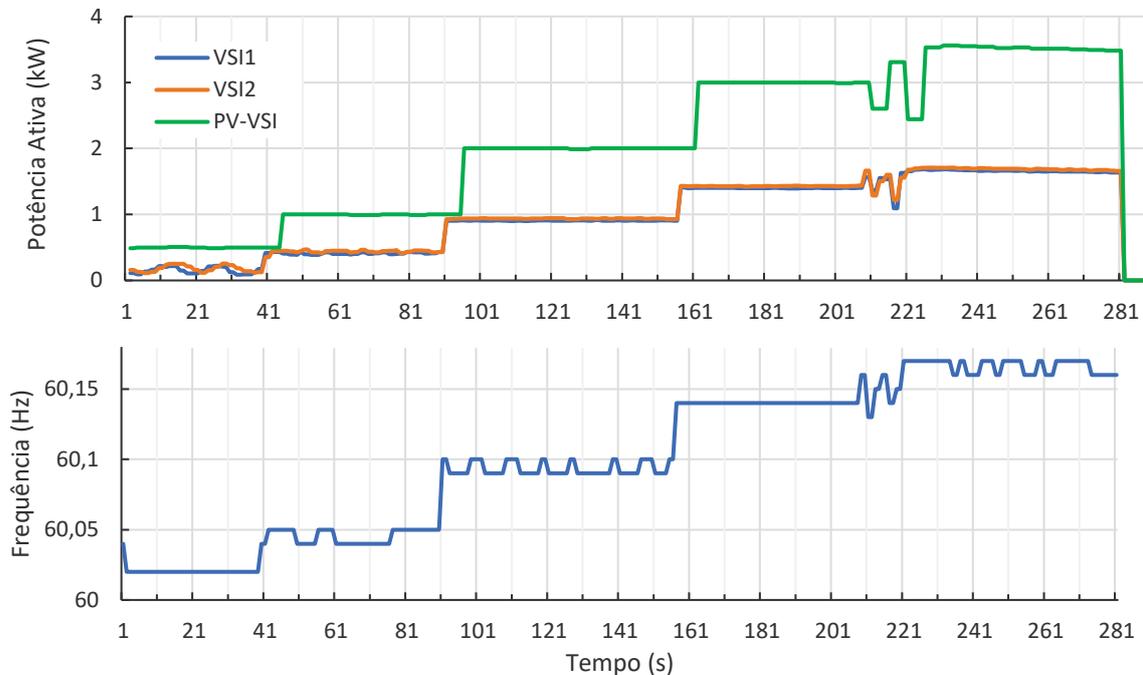
TABELA 3 – ENSAIOS REALIZADOS PARA A SEGUNDA CONFIGURAÇÃO

ENSAIO	CONTROLE	VSI1	VSI2
1	Droop de frequência	Droopkp1 = 4%	Droopkp2 = 4%
2	Droop de frequência	Droopkp1 = 4%	Droopkp2 = 2%
3	Droop de tensão (Q capacitivo)	Droopkq1 = 10%	Droopkq2 = 10%
4	Droop de tensão (Q capacitivo e indutivo)	Droopkq1 = 10%	Droopkq2 = 10%
5	Droop de tensão (Q capacitivo)	Droopkq1 = 10%	Droopkq2 = 5%
6	Droop de tensão (Q capacitivo e indutivo)	Droopkq1 = 10%	Droopkq2 = 5%

FONTE: O Autor (2024).

O GRÁFICO 5 mostra o resultado do primeiro ensaio, que aborda o compartilhamento de potência ativa entre os dios VSIs com o mesmo coeficiente droop ($\text{Droopkp} = 4\%$). O gráfico apresenta a potência ativa absorvida pelo VSI1 e pelo VSI2, a potência ativa fornecida pelo inversor fotovoltaico e a frequência do PCC. Os inversores VSI1 e VSI2 absorveram, cada um, metade potência ativa fornecida pelo PV-VSI, aumentando 0.5 kW de potência ativa para cada degrau de 1 kW no PV-VSI. No instante de 204 s houve uma flutuação na potência fornecida pelo sistema fotovoltaico. Observa-se que o compartilhamento de potência manteve sua precisão, mesmo com a perturbação.

GRÁFICO 5 – COMPARTILHAMENTO DE POTÊNCIA ATIVA ENTRE VCVSIs
($\text{Droopkp1} = \text{Droopkp2} = 4\%$)

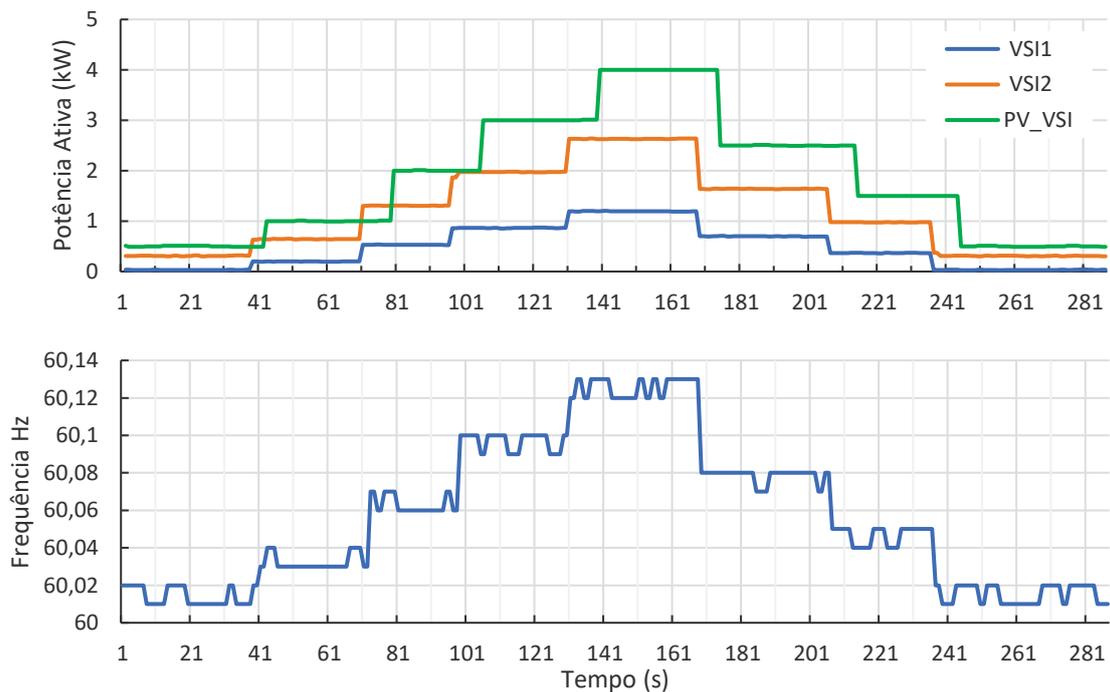


FONTE: O Autor (2024).

A frequência do PCC permaneceu estável durante os estágios estacionários, com oscilações de 0,012 Hz. Para cada variação de 1 kW de potência ativa, a frequência variou aproximadamente 0,044 Hz, metade da sua variação para a configuração com apenas um inversor formador de rede. Isso indica que o aumento de números de VSIs formadores de rede no sistema reduz o desvio de frequência causados pela ação do controle.

O GRÁFICO 6 apresenta o resultado do ensaio 2, que aborda o compartilhamento de potência ativa quando os dois VSIs possuem coeficientes droop diferentes ($k_{p1} = 4\%$ e $k_{p2} = 2\%$). O gráfico apresenta a potência ativa absorvida pelo VSI1 e pelo VSI2, a potência ativa fornecida pelo inversor fotovoltaico e a frequência do PCC.

GRÁFICO 6 – COMPARTILHAMENTO DE POTÊNCIA ATIVA ENTRE DOIS VCVSIs
(DroopKp1 = 4%, Droopkp2 = 2%)

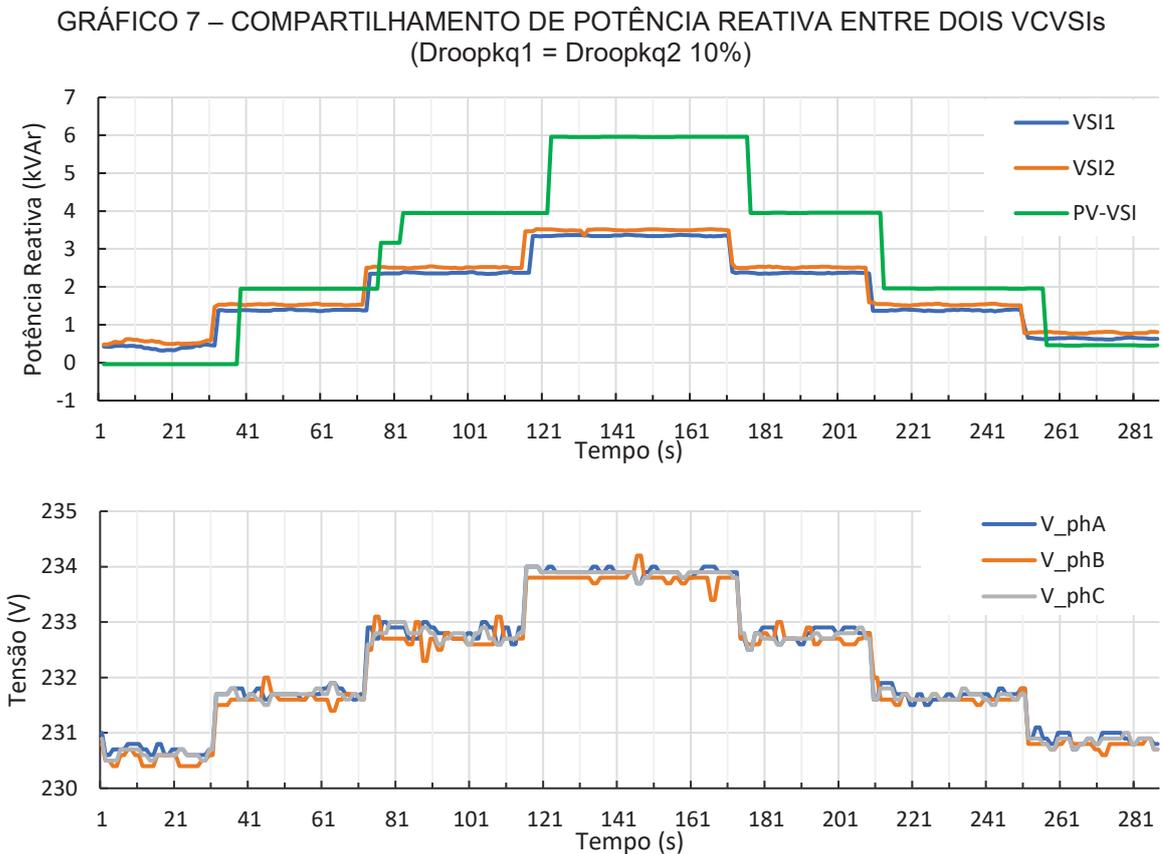


FONTE: O Autor (2024).

A potência do inversor fotovoltaico foi elevada de 0,5 kW a 4 kW, com degraus de 0,5 e 1 kW. A partir do instante 175 s, a potência foi reduzida de 4 a 0,5 kW, com degraus de 1,5 e 1 kW. Para cada variação de 1 kW de potência do PV-VSI, a potência do VSI1 variou aproximadamente 0,33 kW e a do VSI2, 0,67 kW. Como resultado, a frequência variou 0,33 Hz. Com um coeficiente droop de 4%, o VSI1 recebe uma parcela menor da potência ativa fornecida pelo PV-VSI, cerca de 1/3 desse valor. Já o VSI2, com um coeficiente droop de 2%, recebe os 2/3 restantes dessa potência. A frequência permaneceu estável durante os estágios estacionário, com oscilações de até 0,0125 Hz.

O GRÁFICO 7 mostra o resultado do terceiro ensaio, em que $\text{Droopkq1} = \text{Droopkq2} = 10\%$. O gráfico apresenta a potência reativa absorvida pelo VSI1 e pelo

VSI2, a potência reativa fornecida pelo inversor fotovoltaico e a tensão do PCC. A potência reativa do inversor solar foi elevada de 0 até 6 kvar e, em seguida, reduzida a zero, com degraus de 2 kvars. Com o mesmo valor de coeficiente droop, cada um dos dois VSIs recebe a metade da energia disponível.



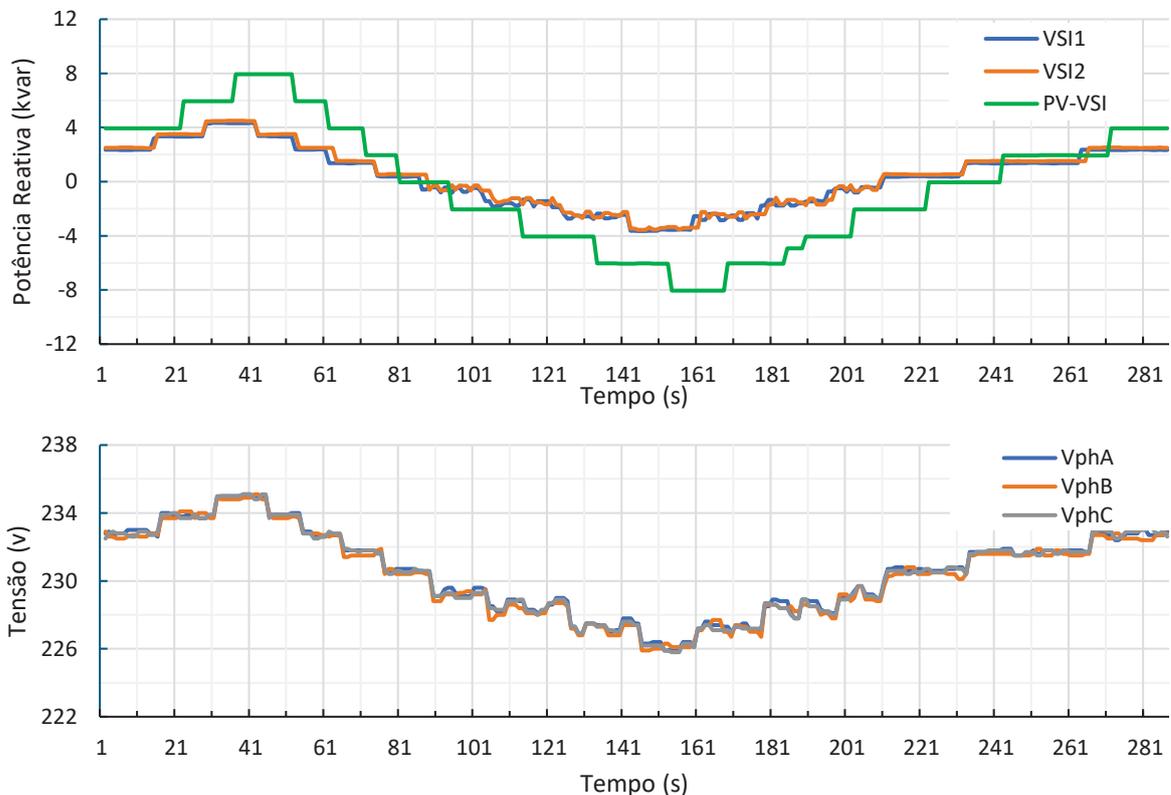
FONTE: O Autor (2024).

A tensão permaneceu relativamente estável no estado estacionário. Quando a potência reativa variou, houve um aumento de 1 V de tensão para cada 2 kvar de potência reativa. Em comparação ao cenário com um único inversor formador de rede, onde a relação era 1 V para cada 1 kvar, observa-se que, quanto maior a quantidade de inversores formadores de rede, menores são os desvios de tensão causados pela ação de controle.

O GRÁFICO 8 apresenta o resultado do quarto ensaio, um cenário de compartilhamento de potência reativa semelhante ao anterior, ou seja, com $\text{Droopkq1} = \text{Droopkq2} = 10\%$. No entanto, desta vez, o PV-VSI opera com potência reativa tanto capacitiva quanto indutiva. Durante os instantes iniciais, a potência reativa no PV-VSI é capacitiva, ou seja, o PV-VSI fornece a potência reativa. Essa potência é aumentada

até 8 kvar e, em seguida, reduzida a zero no instante de 81s. A partir desse momento, o PV-VSI passa a absorver reativo (potência reativa indutiva) e os dois VCVSIs passam a fornecer reativo (potência reativa capacitiva). A potência reativa indutiva do PV-VSI é aumentada até 8 kvar e depois reduzida a zero nos instantes de 243 s. É possível observar que o compartilhamento de potência reativa possui um bom desempenho, tanto com os VSIs fornecendo potência reativa, quanto absorvendo. No entanto, o compartilhamento com uma potência reativa capacitiva nos VCVSIs foi menos estável.

GRÁFICO 8 – COMPARTILHAMENTO DE POTÊNCIA REATIVA CAPACITIVA E INDUTIVA ENTRE DOIS VCVSIs (Droopkq1 = Droopkq2 = 10%)



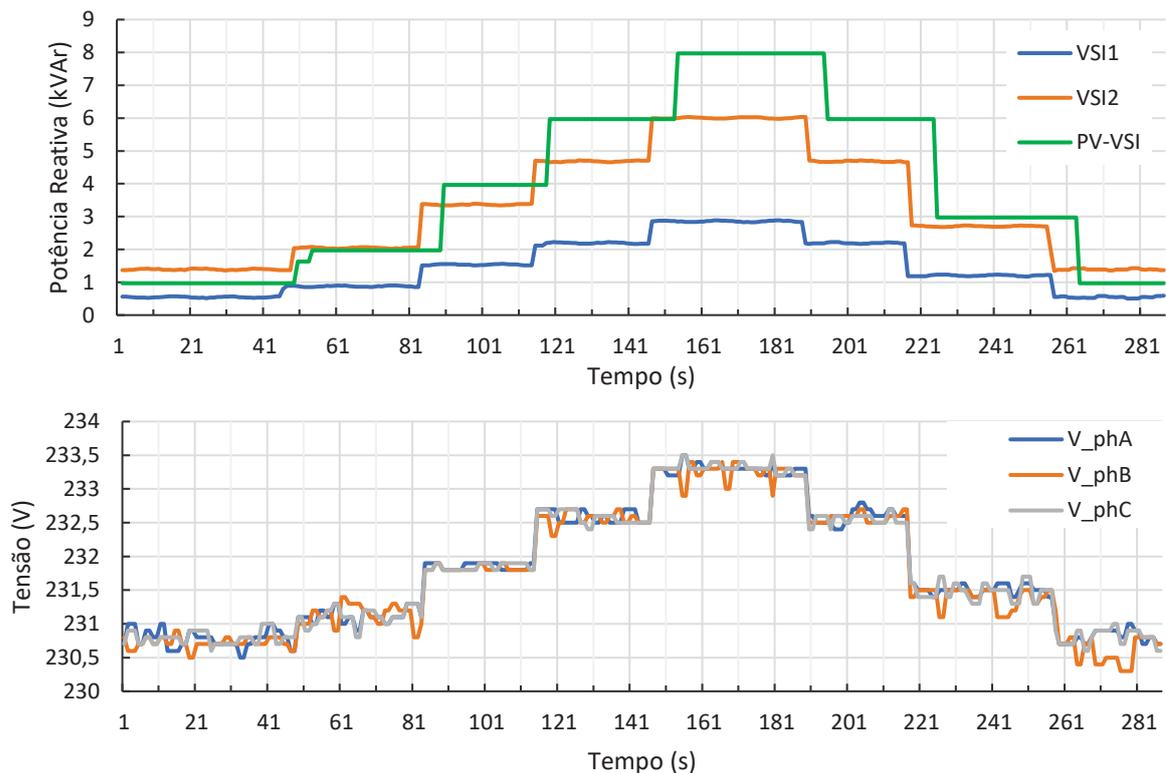
FONTE: O Autor (2024).

Quando os VCVSIs absorvem potência reativa, as variações de tensão ocorrem acima da tensão nominal (231 V). Ao fornecer potência reativa, a tensão caiu para níveis inferiores ao valor nominal. Observa-se que a estabilização da tensão é mais eficaz no primeiro caso.

O GRÁFICO 9 apresenta o resultado do quinto ensaio, onde os dois VCVSIs apresentam coeficientes droop de tensão diferentes ($kq1 = 10\%$ e o $kq2 = 5\%$). O

gráfico apresenta a potência reativa absorvida pelo VSI1 e pelo VSI2, a potência reativa fornecida pelo inversor fotovoltaico e a tensão do PCC. A potência reativa foi elevada de 0 até 8 kvar, com degraus de 2 kvar e, em seguida, reduzida a zero em degraus de 1,3 e 0,5 kvar. O VSI1 com o coeficiente Droopkq de 10% recebe 1/3 da energia fornecida pelo PV-VSI, e o VSI2, com Droopkq = 5%, recebe os outros 2/3.

GRÁFICO 9 – COMPARTILHAMENTO DE POTÊNCIA REATIVA ENTRE DOIS VCVSIs
(Droopkq1 = 10% e Droopkq2 = 5%)



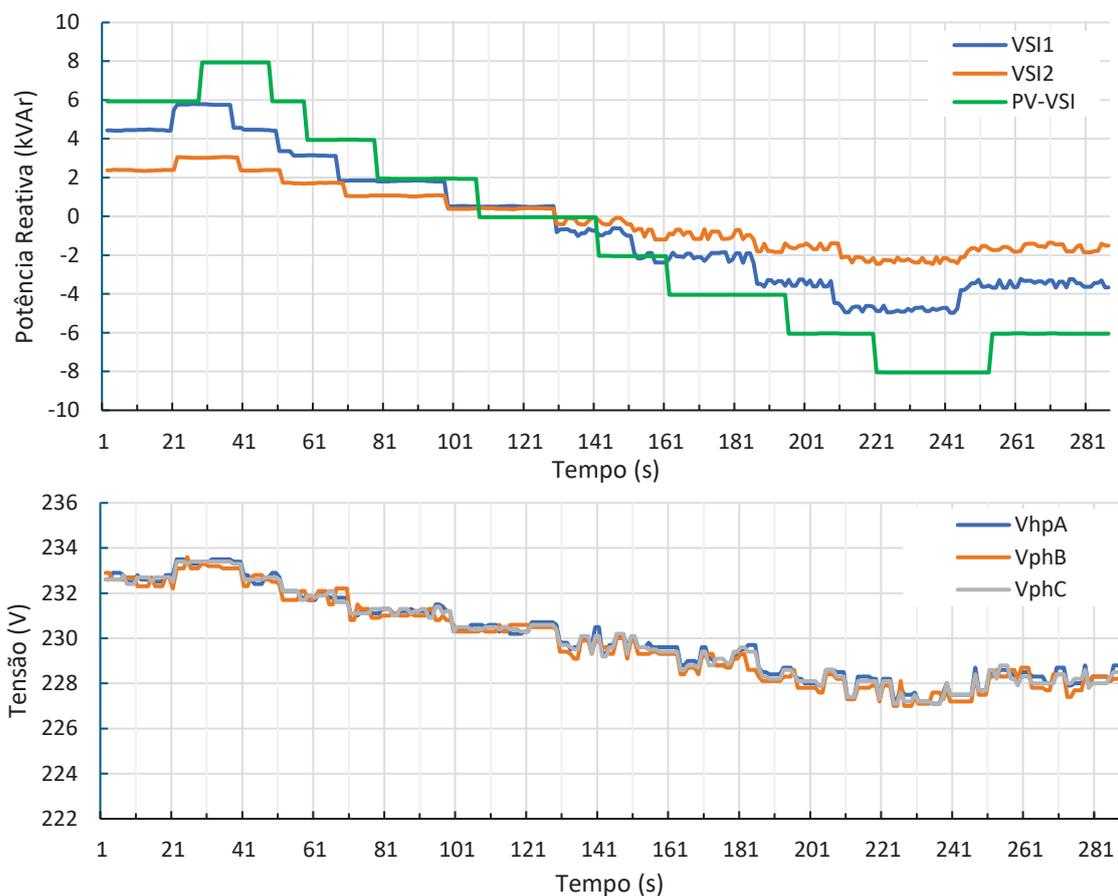
FONTE: O Autor (2024).

Como explicado anteriormente, o inversor fotovoltaico entrega uma potência reativa de aproximadamente 1 kvar, que não aparece na medição, por isso, no gráfico, a soma das potências do VSI1 e VSI2 aparenta ser maiores que a energia fornecida pelo inversor fotovoltaico.

Observa-se que a tensão tende a ser menos estável para valores de potência reativa inferiores a 2 kvar, devido a flutuações maiores na potência reativa entregue pelo inversor fotovoltaico, quando os seus valores são muito baixos. Acima de 2 kvar, a tensão apresentou uma relativa estabilidade. Para cada 2 kvar de potência reativa, houve uma elevação de aproximadamente 0,8 V.

O GRÁFICO 10 apresenta os resultados do sexto ensaio, demonstrando o compartilhamento de potência reativa entre dois VSIs com coeficientes droop diferentes ($\text{Droop}_{kq1} = 10\%$ e $\text{Droop}_{kq2} = 5\%$). O compartilhamento de potência foi possível com os VSIs operando com características indutivas e capacitivas. A tensão do PCC diminuiu para baixo do valor nominal quando o PV-VSI passou a operar com a potência reativa indutiva, e permaneceu menos estável devido às flutuações da potência reativa.

GRÁFICO 10 – COMPARTILHAMENTO DE POTÊNCIA REATIVA CAPACITIVA E INDUTIVA ENTRE DOIS VCVSIs ($\text{Droop}_{kq1} = 10\%$ e $\text{Droop}_{kq2} = 5\%$)



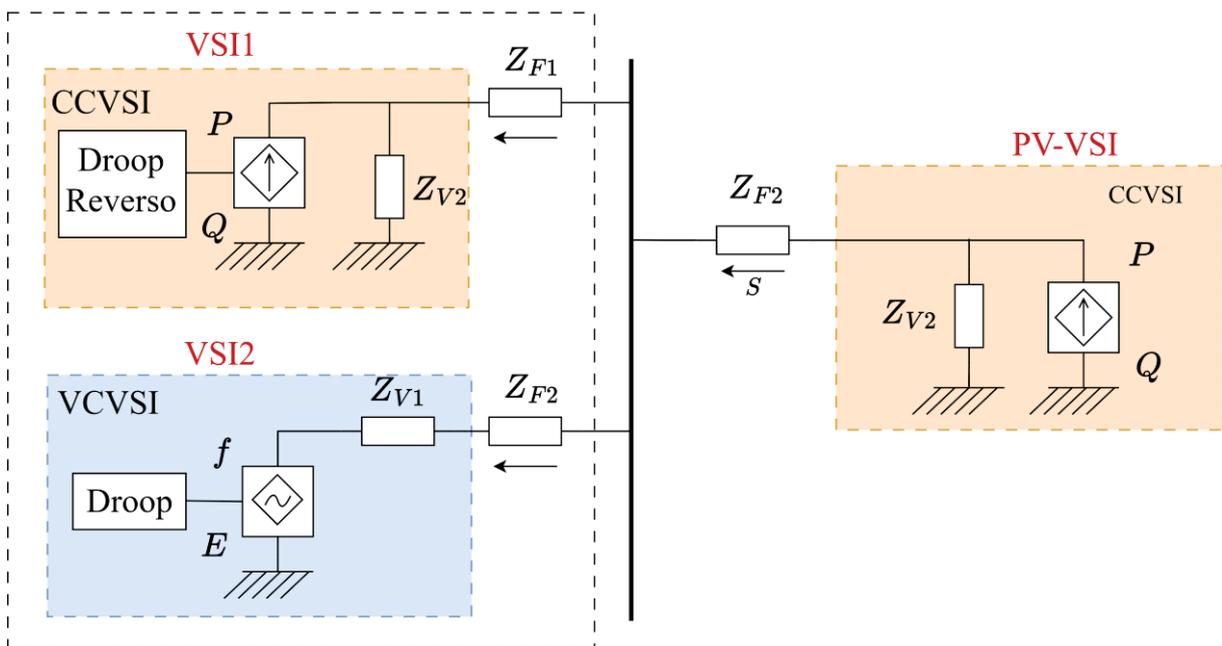
FONTE: O Autor (2024).

5.3 CONFIGURAÇÃO 3 – MICRORREDE COM UM VSI FORMADOR DE REDE E UM VSI DE SUPORTE À REDE.

A FIGURA 24 apresenta a terceira configuração, na qual um VCVSI controlado pelo droop opera em paralelo com um CCVSI, que utiliza o droop reverso, em uma microrrede ilhada alimentada a partir do PV-VSI. Os ensaios nesta configuração foram

realizados para analisar o compartilhamento de potência entre o VCVSI e o CCVSI, que são controlados por droop e droop reverso, respectivamente. O controle droop reverso foi implementado no CLP, e a malha de controle externa ao inversor foi fechada através da comunicação Modbus. O controle foi projetado para ter uma resposta lenta para evitar instabilidade no compartilhamento de potência entre o CCVSI e VCVSI. Para esta configuração, foram realizados seis ensaios. Os ensaios e os coeficientes droop utilizados estão apresentados na TABELA 4.

FIGURA 24 - MICRORREDE ILHADA COM UM VCVSI FORMADOR DE REDE E UM CCVSI DE SUPORTE À REDE



FONTE: O autor (2024).

TABELA 4 – ENSAIOS REALIZADOS PARA A SEGUNDA CONFIGURAÇÃO

ENSAIO	CONTROLE	VSI1	VSI2
1	Droop de frequência	Droopkp1 = 4%	Droopkp2 = 4%
2	Droop de frequência	Droopkp1 = 2%	Droopkp2 = 4%
3	Droop de tensão (Q capacitivo)	Droopkq1 = 10%	Droopkq2 = 10%
4	Droop de tensão (Q capacitivo e indutivo)	Droopkq1 = 10%	Droopkq2 = 10%
5	Droop de tensão (Q capacitivo)	Droopkq1 = 5%	Droopkq2 = 10%
6	Droop de tensão (Q capacitivo e indutivo)	Droopkq1 = 5%	Droopkq2 = 10%

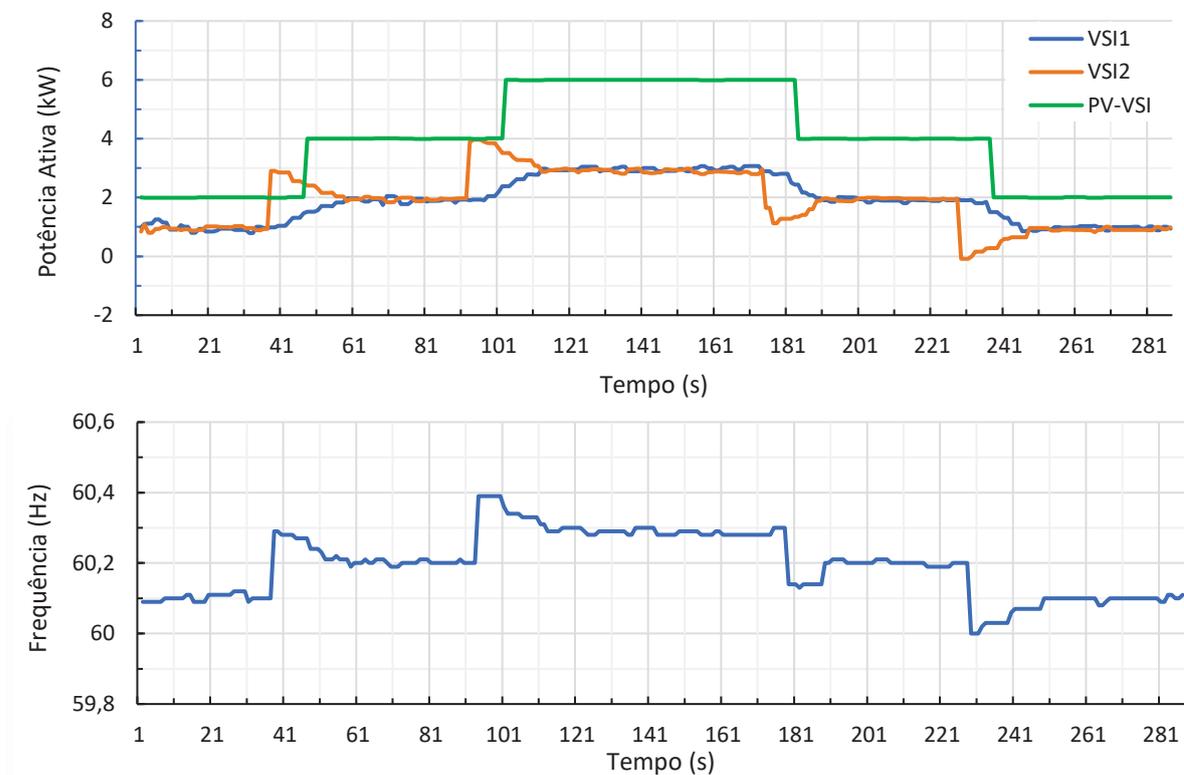
FONTE: O Autor (2024).

O GRÁFICO 11 apresenta o resultado do primeiro ensaio, que aborda o compartilhamento de potência ativa entre os dios VSIs com o mesmo coeficiente

droop de frequência ($\text{Droop}_{kp} = 4\%$). O gráfico apresenta a potência ativa absorvida pelo VSI1 e pelo VSI2, a potência ativa fornecida pelo inversor fotovoltaico e a frequência do PCC. Com degraus de 2 kW, a potência do PV-VSI foi elevada de 2 kW para 6 kW e depois reduzida para 2 kW. O controle droop reverso permitiu que o VSI1 participasse do compartilhamento de potência, recebendo metade da potência ativa fornecida pelo PV-VSI.

Pelo gráfico, é possível observar que a resposta do VCVSI é significativamente mais rápida que a do CCVSI. Inicialmente, o VCVSI assume todo o degrau de potência ativa produzido pelo PV-VSI. À medida em que a potência do CCVSI cresce e ele começa a assumir a sua parcela no compartilhamento de potência, a potência do VCVSI decresce até que ambos se estabilizem na nova potência de operação. Nos degraus negativos da potência do PV-VSI (instantes 185 s e 240 s), o comportamento foi similar, com o VCVSI sendo responsável por toda a variação inicial de potência ativa. Com o tempo, a potência do CCVSI decresceu, e ambos se estabilizaram na nova potência de operação.

GRÁFICO 11 – COMPARTILHAMENTO DE POTÊNCIA ATIVA ENTRE UM VCVSI E UM CCVSI
($\text{Droop}_{kp1} = \text{Droop}_{kp2} = 4\%$)



FONTE: O autor (2024).

Quanto a frequência durante o ensaio, com a variação da potência ativa do PV-VSI, ocorreram aumentos de aproximadamente 0,2 Hz para cada degrau de 2 kW na potência ativa do PV-VSI. Essa relação entre a variação inicial de potência ativa e de frequência é parecida com a do ensaio 2 da primeira configuração, em que apenas um VCVSI opera conectado na microrrede. Isso se deve ao fato de apenas o VCVSI ser o responsável por toda a variação inicial da potência ativa. À medida em que o CCVSI assume a sua parcela no compartilhamento de potência, a frequência sofre uma variação gradual até alcançar o seu novo ponto de operação.

No estado estacionário, a frequência permaneceu relativamente estável, com oscilações de aproximadamente 0,02 Hz. Para cada 2 kW de variação da potência ativa do PV-VSI a frequência variou aproximadamente 0,1 Hz, ou seja, a variação esperada da frequência para o compartilhamento de potência entre dois VSIs em que $Droop_{kp}$ é de 4%.

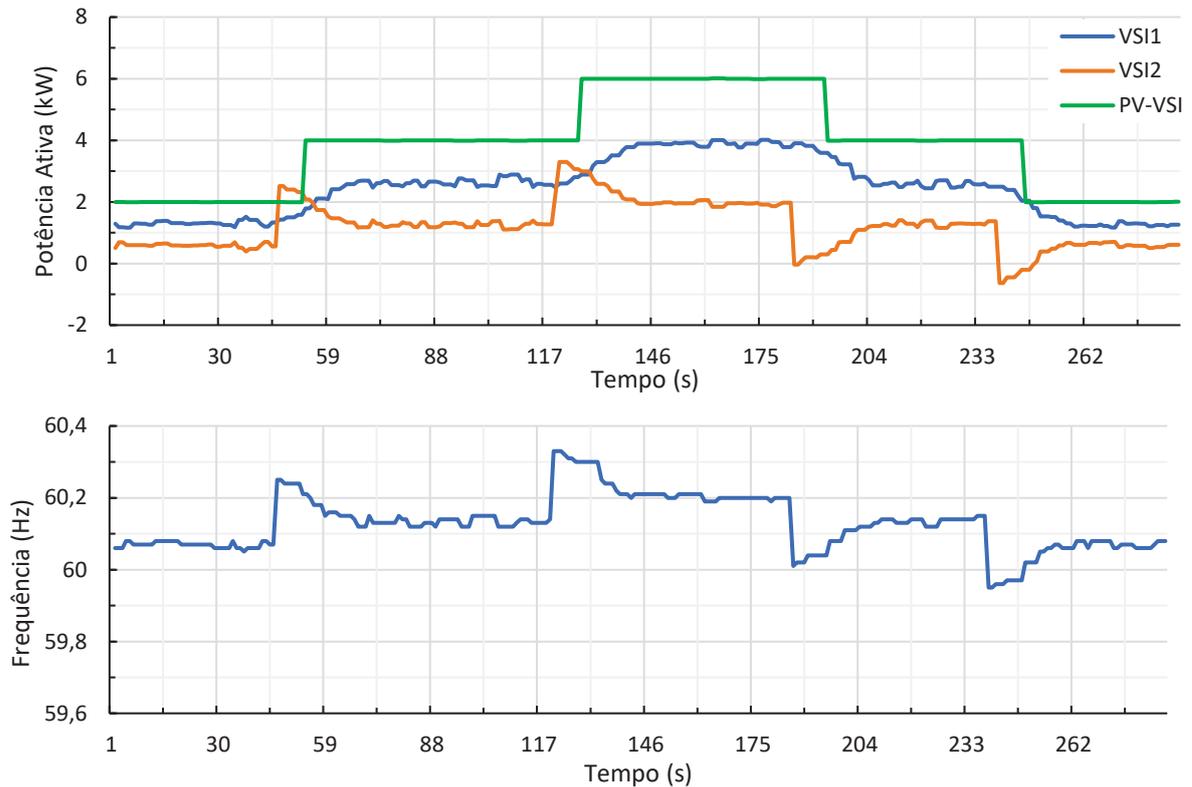
O GRÁFICO 12 mostra os resultados do segundo ensaio, no qual foram utilizados coeficientes droop de frequência diferentes ($Droop_{kp1} = 2\%$ e $Droop_{kp2} = 4\%$). De forma similar ao ensaio anterior, o VCVSI assume toda a variação inicial da potência ativa proveniente do PV-VSI, enquanto a potência do CCVSI cresce seguindo uma rampa até se estabilizar em seu respectivo ponto de operação. No estado estacionário, o VSI1, com um coeficiente droop menor, assume o dobro da potência ativa do VSI2, de forma similar ao compartilhamento de potência observado no ensaio 2 da segunda configuração.

Comparado ao ensaio anterior, observa-se que, pelo fato do VCVSI estar com uma potência menor, os seus picos de potência, durante as variações na potência do PV-VSI, não são muito maiores que a potência de operação do CCVSI. Assim, para uma operação nesta configuração, trabalhar com o VCVSI assumindo uma parcela menor de potência ativa pode evitar ou diminuir a sobrecarga nele, principalmente quando os degraus de potência fornecidos pelo PV-VSI forem muito altos. No instante de 185 s, a potência ativa do VSI2 é reduzida até zero, e no instante de 240 s, a potência ativa fica negativa. Isso indica que, nessa configuração, há a possibilidade de ocorrer uma inversão indesejada no sentido do fluxo de potência no VCVSI quando uma carga é retirada da microrrede, o que seria um problema caso o VCVSI não for bidirecional.

Para degraus de 2 kW, a variação inicial da frequência é de 0,2 Hz, a mesma observada no ensaio anterior. Isso indica que o valor depende apenas da variação de potência ativa do VCVSI. O valor de frequência no estado estacionário, por outro lado,

é menor em relação ao ensaio anterior, com uma variação de aproximadamente 0,5 Hz para cada degrau 2 kW de potência ativa do PV-VSI. O resultado é similar ao ensaio 2 da segunda configuração.

GRÁFICO 12 – COMPARTILHAMENTO DE POTÊNCIA ATIVA ENTRE UM VCVSI E UM CCVSI
(Droopkp1 = 2% e Droopkp2 = 4%)



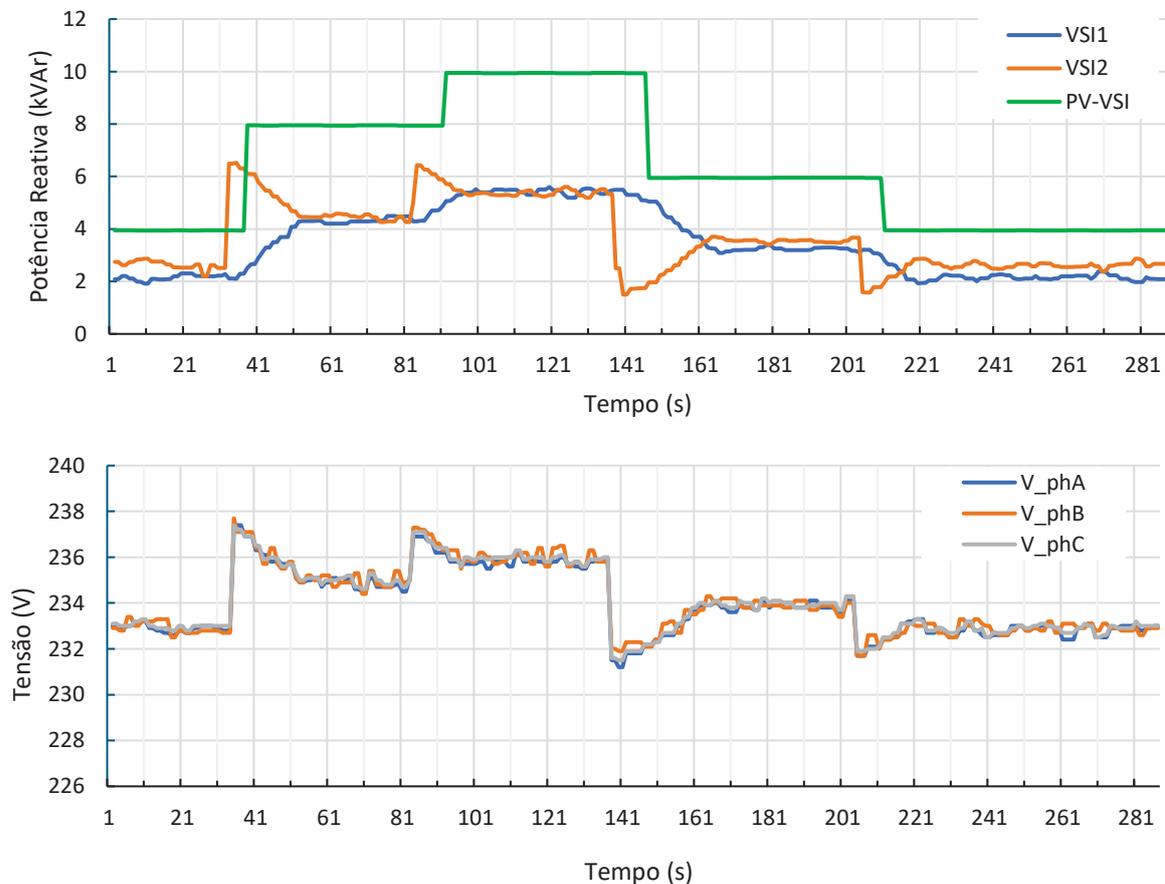
FONTE: O autor (2024).

O GRÁFICO 13 apresenta os resultados do terceiro ensaio, em que ambos os inversores (VSI1 e VSI2) têm o mesmo coeficiente droop de tensão ($\text{droopkpq} = 10\%$). Para a análise, a potência do PV-VSI foi elevada e reduzida em degraus de 1 e 2 kvar. Para cada variação de 2 kvar da potência do PV-VSI, os dois VSIs variaram 1kvar cada, uma resposta similar ao compartilhamento entre dois VCVSIs. A soma das potências do VSI1 e do VSI2 é ligeiramente maior que a potência do PV-VSI. Isso ocorre porque, como explicado anteriormente, o PV-VSI entrega uma potência reativa adicional de 1 kvar que não aparece nas medições. Assim como nos ensaios com a potência ativa, o CCVSI possui uma ação mais lenta. Dessa forma, é possível observar que, nos instantes 26 s, 81 s, 128 s, e 202 s, o VCVSI assume toda a variação inicial de carga, enquanto a potência reativa do CCVSI aumentou ou diminuiu

gradualmente até as duas potências se equalizarem. Pelo gráfico, pode-se observar que o compartilhamento de potência reativa tende a melhorar a medida em que aumenta o valor de potência reativa fornecida pelo PV-VSI.

Para variações de 4 kvar a tensão variou aproximadamente 4,5 V. Uma relação similar à observada no ensaio com um único VCVSI. Em seguida, a tensão decresceu de forma gradual à medida que o CCVSI assume a sua parcela da potência reativa. Considerando os valores nos estados estacionários, os degraus de tensão são de aproximadamente 2 V para cada degrau 4 kvar de potência reativa do PV-VSI. Uma relação similar à observada no compartilhamento de potência entre dois VCVSIs. No estado estacionário, a tensão é relativamente estável, no entanto, o fato de o VCVSI ter que assumir toda a variação inicial de potência, resulta numa variação de tensão maior nessa configuração em relação ao anterior, e o tempo de resposta do CCVSI impacta no tempo de estabilização da tensão no seu novo ponto de operação.

GRÁFICO 13 – COMPARTILHAMENTO DE POTÊNCIA REATIVA ENTRE UM VCVSI E UM CCVSI (Droopkq1 = Droopkq2 = 10%)

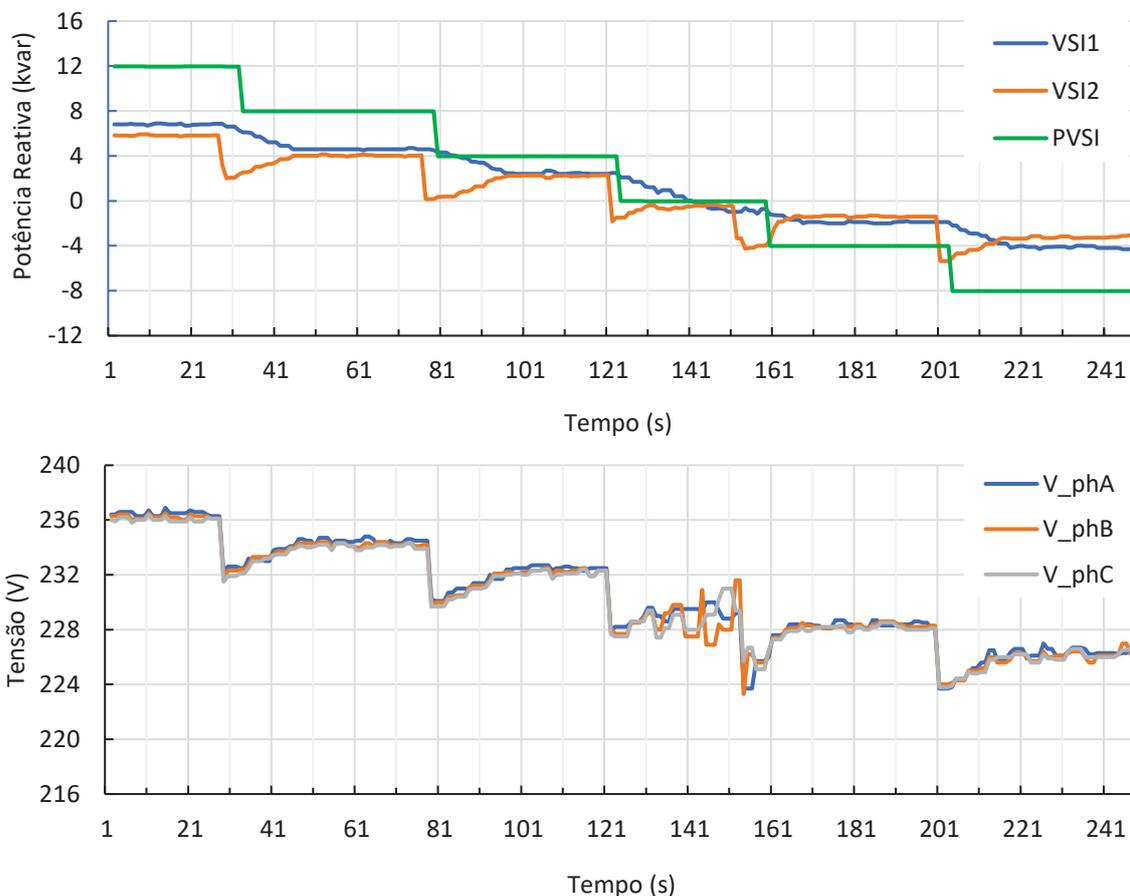


FONTE: O Autor (2024).

O GRÁFICO 14 apresenta os resultados do quarto ensaio, em que os dois VSIs operam com o mesmo coeficiente droop ($\text{Droopkq1} = \text{Droopkq2} = 10\%$). Durante os instantes iniciais, a potência reativa no PV-VSI é capacitiva, ou seja, o PV-VSI fornece potência reativa. A potência reativa inicial de 12 kvar é reduzida à 0 kvar em degraus de 4 kvar. A partir do instante de 161 s, o PV-VSI passa a absorver reativo (potência reativa indutiva) e os dois VSIs (VSI1 e VSI2) passam a fornecer reativo (potência reativa capacitiva). Em seguida, a potência reativa indutiva do PV-VSI é aumentada até 8 kvar em degraus de 4 kvar. É possível observar que o compartilhamento de potência reativa possui um bom desempenho, tanto com o PV-VSI fornecendo potência reativa quanto absorvendo.

A tensão do PCC permaneceu relativamente estável nos estados estacionários, com a exceção dos instantes de 121 s e 161s em que a potência do PV-VSI é igual a zero.

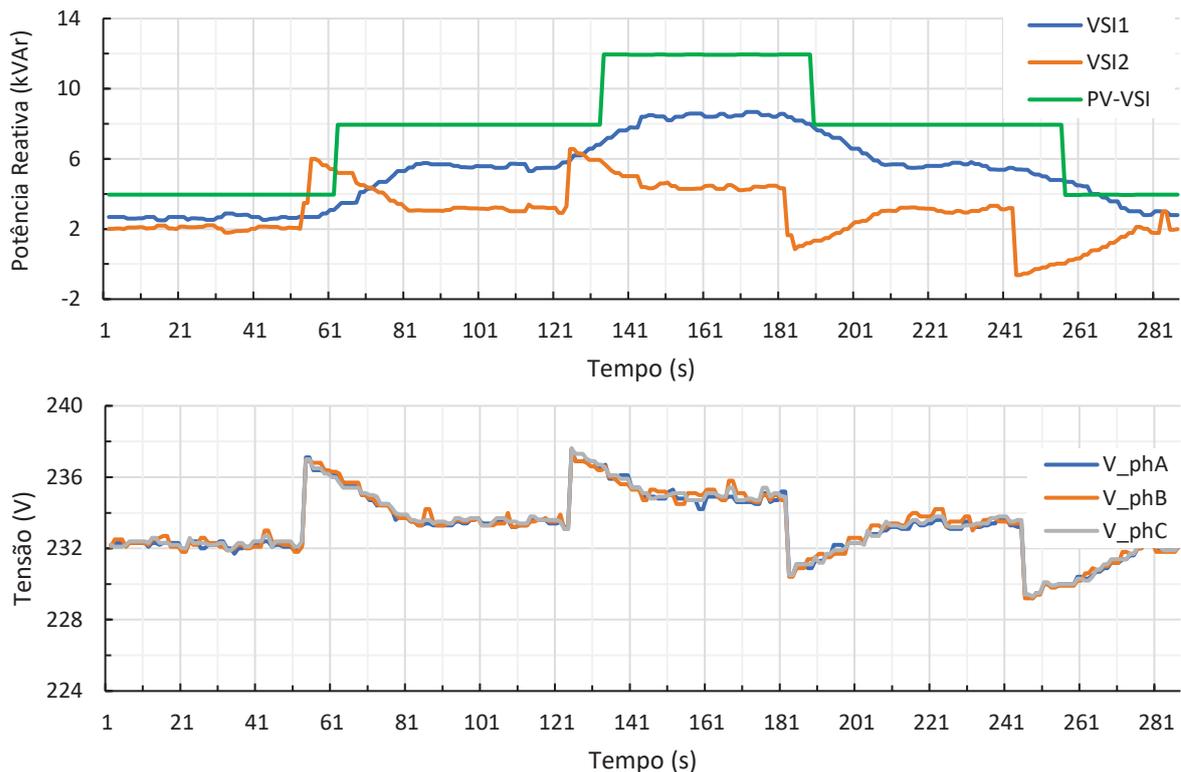
GRÁFICO 14 – COMPARTILHAMENTO DE POTÊNCIA REATIVA (CAPACITIVA E INDUTIVA) ENTRE UM CCVSI E UM VCVSI ($\text{Droopkq1} = \text{Droopkq2} = 10\%$)



FONTE: O autor (2024).

O GRÁFICO 15 mostra o resultados do quinto ensaio, em que os dois VSIs operam com coeficientes droop de tensão diferentes ($\text{Droopkq1} = 5\%$ e $\text{Droopkq2} = 10\%$). Degraus de 4 kvar foram introduzidos no PV-VSI, aumentando a potência reativa de 4 kvar para 12 kvar e, em seguida, reduzindo-a para 4kvar. O VSI1, com coeficiente droop menor, recebe uma parcela maior da potência Reativa. Para cada degrau de 4 kvar, a variação inicial de tensão é de aproximadamente 4,5 V. O mesmo do ensaio anterior, ou seja a variação inicial da tensão depende apenas do VCVSI. No entanto, considerando os valores no estado estacionário, os degraus de tensão são de aproximadamente 1,5 V. Um resultado similar ao do compartilhamento entre dois VCVSIs.

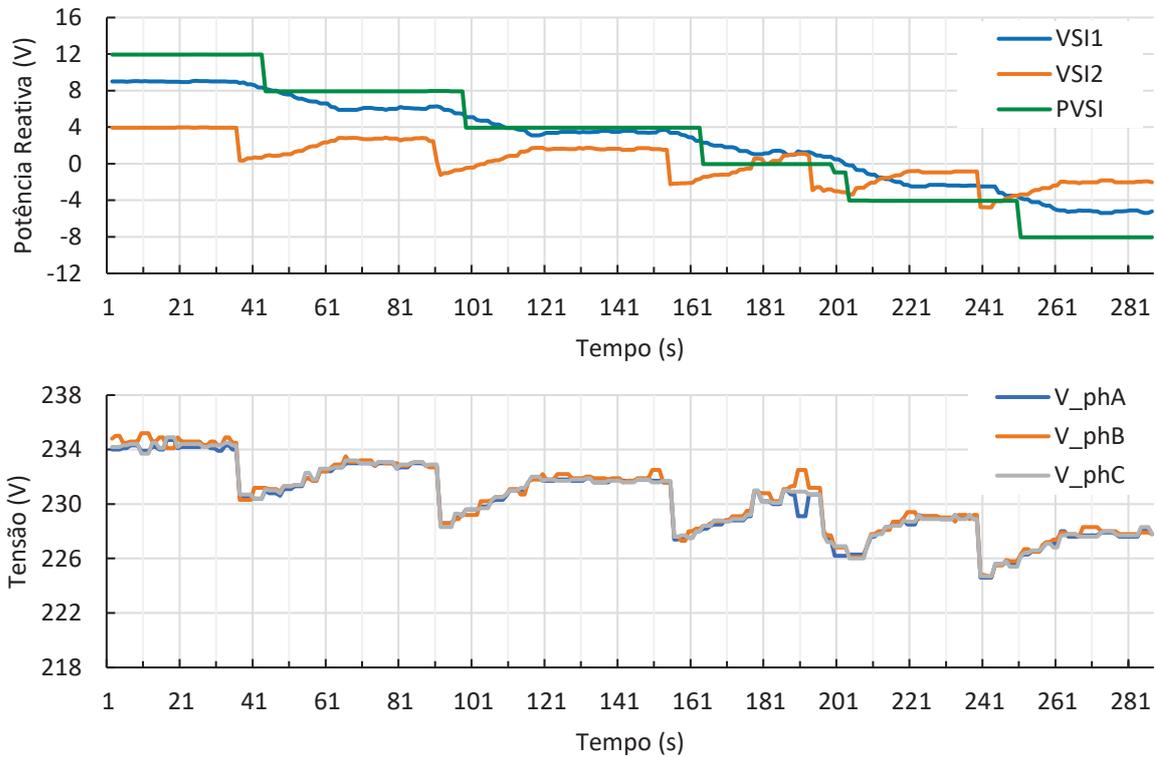
GRÁFICO 15 – COMPARTILHAMENTO DE POTÊNCIA REATIVA ENTRE UM VCVSI E UM CCVSI
($\text{Droopkq1}=5\%$ e $\text{Droopkq2} = 10\%$)



FONTE: O autor (2024).

O GRÁFICO 16 mostra o resultados do sexto ensaio, em que os dois VSIs operam com coeficientes droop de tensão diferentes ($\text{Droopkq1} = 5\%$ e $\text{Droopkq2} = 10\%$). O compartilhamento de potência foi possível com os VSIs operando com características indutivas e capacitivas. A tensão do PCC diminuiu para baixo do valor nominal quando o PV-VSI passou a operar com a potência reativa indutiva.

GRÁFICO 16 – COMPARTILHAMENTO DE POTÊNCIA REATIVA (CAPACITIVA E INDUTIVA) ENTRE UM CCVSI E UM VCVSI (Droop_{kq1} = 5% e Droop_{kq2} = 10%)



FONTE: O autor (2024).

5.4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Para o compartilhamento de potência em uma microrrede ilhada, foram realizados diferentes ensaios em três configurações de operação da microrrede. A primeira configuração não avaliou o compartilhamento de potência, mas permitiu analisar as respostas do controle droop configurado no inversor, considerando diferentes valores de operação de potência ativa e reativa e diferentes valores do coeficiente droop. Em todos os ensaios, a frequência do PCC apresentou variações em função da potência. Essas variações da frequência em relação à potência ativa estão de acordo com os coeficientes droop introduzidos. Resultados semelhantes foram observados na relação entre a tensão e a potência reativa.

Na segunda configuração, foi possível observar o compartilhamento de potência entre dois VCVSIs. A microrrede operou de forma estável, com a tensão e a frequência variando dentro dos limites do controle droop. Quanto ao compartilhamento de potência, cada um dos VSIs recebeu uma potência proporcional ao percentual dos coeficientes droop configurados. Para a potência ativa, só foi possível observar o

compartilhamento de potência com o fluxo de potência negativo, do PVSI para os dois VSIs. Em contraste, para a potência reativa, foi possível observar o compartilhamento com a energia fluindo nas duas direções (reativo indutivo e reativo capacitivo).

Na terceira configuração, teve o compartilhamento de potência entre um VCVSI formador de rede e um CCVSI de suporte à rede. Não foi possível estabelecer o compartilhamento de potência entre os dois VSIs em que o droop reverso do CCVSI apresenta uma resposta rápida. Por isso, o controle foi projetado para ter uma resposta mais lenta em relação ao VCVSI. Assim, o VCVSI assume toda a variação inicial de potência ativa fornecido pelo PV-VSI. Na medida em que a potência do CCVSI cresce e assume a sua parcela no compartilhamento de potência, a potência do VCVSI decresce até os dois se estabilizarem no novo ponto de operação, no qual cada inversor fornece uma potência proporcional ao seu coeficiente droop. Resultados similares são apresentados por Pelacini et al. (2020) e Array e Taguchi (2022) a partir de simulações e por Sadeque, Sharma e Mirafza (2021) a partir de resultados experimentais. Em Wu et al. (2014) os CCVSIs são reconectados na microrrede instantes depois da variação da carga e vão assumindo a sua parcela no compartilhamento de potência na medida em que são conectados.

Nos ensaios em que foram utilizados coeficientes droop diferentes (ensaios 2 e 5), observou-se que, devido à potência menor do VCVSI, o inversor pode receber variações altas de potência sem correr o risco de se sobrecarregar. Portanto, ao operar nessa configuração, trabalhar com o VCVSI assumindo uma menor parcela de potência ativa pode evitar ou diminuir a sobrecarga nele, principalmente quando os degraus de potência fornecidos pelo PV-VSI forem muito altos. Observou-se também que, nesse modo de operação, há a possibilidade de ocorrer uma inversão indesejada no sentido do fluxo de potência no VCVSI quando uma carga é retirada da microrrede, o que seria um problema caso o VCVSI não for bidirecional.

Considerando tudo o que foi apresentado até aqui, pode-se concluir que a configuração 3 oferece um desempenho quase equivalente ao da configuração 2 no compartilhamento de potência. No estado estacionário, não há diferenças significativas entre as duas configurações. No entanto, durante os transitórios, a configuração 2 apresenta uma melhor performance, pois não há variação no tempo de resposta entre os dois inversores. Na configuração 3, pelo fato do VCVSI ter que lidar com toda a variação inicial de potência, os picos de potência, durante os transitórios, podem ser elevados, isso pode resultar no sobrecarregamento dos

VCVSI, caso a sua potência nominal for baixa em comparação à potência que circula nos CCVSI. Além disso, estudos comparando o desempenho de VCVSI e CCVSI (KIKUSATO, 2023; VERBE; SHIGENOBU; ITO, 2021; GURULE et al., 2022; PELACINI et al., 2020) mostram que uma inserção desproporcionalmente alta de CCVSI na microrrede tende a diminuir a estabilidade da frequência da rede, devido às estruturas de controle e aos desafios relacionados ao PLL.

Um outro fator a se considerar no compartilhamento de potência entre um VCVSI e um CCVSI é a possibilidade de ocorrer uma inversão indesejada no sentido do fluxo de energia em situações de retirada de carga, conforme demonstrado nos ensaios 2 e 4.

A configuração 3, embora não alcance o mesmo desempenho da configuração 2, oferece algumas vantagens que a tornam indispensável no controle de microrredes ilhadas. Por exemplo, um fator importante a se analisar na comparação entre as duas configurações é o tempo de resposta do VSI. Em microrredes baseados puramente em DERs conectados a partir VSI, a resposta rápida dos VCVSI é um benefício. Entretanto, de acordo com Gurule et al., (2022) muitos sistemas ilhados ainda utilizam equipamentos rotativos. Por isso, uma resposta mais lenta, que seja na ordem das constantes de tempo de inércia das máquinas rotativas, pode ajudar na estabilidade dos sistema.

Um segundo fator é a impedância de linha, ao contrário do paralelismo entre VCVSI, o compartilhamento de potência entre um CCVSI e um VCVSI não depende da impedância de linha, como demonstrado pelo Wang et al. (2017). Isso elimina a necessidade de uso de uma impedância virtual para se conseguir o desacoplamento entre a potência ativa e reativa.

Por fim, muitos VSI não são projetados para operar como VCVSI. Assim, implementar um CCVSI com controle droop reverso utilizando CLPs é uma abordagem interessante para permitir que o VSI participe no compartilhamento de potência e na regulação da frequência e da tensão da rede, contribuindo, conseqüentemente, para a estabilização da rede.

6 CONCLUSÃO

O presente trabalho propõe analisar o compartilhamento de potência entre dois VSIs em uma microrrede CA ilhada com o controle droop. O estudo foi desenvolvido considerando duas abordagens de controle: (1) compartilhamento de potência entre dois VCVSIs, em que os dois atuam como formadores de rede; e (2) compartilhamento de potência entre um VCVSI e um CCVSI, em que o primeiro forma a rede e o segundo entra como um VSI de suporte à rede.

Os inversores bidirecionais possuem a capacidade de operar como um VCVSI e um CCVSI. No primeiro caso o inversor possui um controle droop nativo e uma impedância virtual para o paralelismo dos VSIs em um microrrede ilhada, assim, os parâmetros de operação do controle droop são configurados a partir do IHM antes do inversor entrar em operação. No segundo caso, um controle droop reverso externo foi projetado no CLP para permitir o inversor operar como um CCVSI de suporte à rede.

A primeiras tentativas de realizar o compartilhamento de potência entre o VCVSI e o CCVSI resultaram em oscilações na tensão e frequência, consequentemente, na potência ativa e reativa, o que atrapalhou o compartilhamento de potência. Para evitar isso, o controle droop reverso foi projetado para ter uma resposta mais lenta em relação ao controle droop do VCVSI. Assim, o VCVSI assume toda a variação inicial de potência ativa fornecido pelo PV-VSI.

Resultados experimentais foram obtidos configurando a microrrede em três arranjos diferentes. A primeira configuração não aborda o compartilhamento de potência em si, ela serve para avaliar a resposta do controle droop dos inversores bidirecionais. A segunda configuração aborda o compartilhamento de potência entre dois VCVSIs com o controle droop. A terceira configuração aborda o compartilhamento de potência entre um VCVSI controlado por droop e um CCVSI controlado por droop reverso.

Os testes de compartilhamento de potência foram realizados alterando a potência ativa e reativa na saída do PV-VSI e analisando as respostas dos inversores bidirecionais à essas variações. Foi possível analisar o compartilhamento de potência ativa com o fluxo de potência negativo (do PV-VSI para VSI1 e VSI2). Para a potência reativa, foi possível analisar o compartilhamento de potência com a potência reativa indutiva (do PV-VSI para VSI1 e VSI2) e capacitiva (no sentido contrário).

No compartilhamento de potência com o paralelismo entre dois VCVSIs, a microrrede ilhada operou de forma estável com a tensão e frequência variando dentro dos limites do controle droop. Cada um dos VSIs recebeu potência ativa e reativa proporcional ao percentual dos coeficientes droop configurados para operação.

No compartilhamento de potência com o paralelismo entre o VCVSI formador de rede e o CCVSI de suporte à rede. A microrrede também operou de forma estável, com a tensão e a frequência variando dentro dos limites do controle droop, e cada inversor recebeu um percentual da potência ativa e reativa proporcional aos coeficientes droop configurados. Como o CCVSI foi projetado para ter uma resposta mais lenta, o VCVSI responde por toda a variação inicial de potência introduzida pelo PV-VSI. A potência do CCVSI cresce gradualmente e aos poucos assume a sua parte no compartilhamento de potência. Na medida em que a potência do CCVSI cresce, a potência do VCVSI decresce até os dois se estabilizarem em um novo ponto de operação.

Comparando as configurações abordadas, pode-se concluir que a configuração 3 (paralelismo entre VCVSI e CCVSI) oferece um desempenho quase equivalente ao da configuração 2 (paralelismo entre dois VCVSIs) no compartilhamento de potência. No estado estacionário, não há diferenças significativas entre as duas configurações. No entanto, durante os transitórios, a configuração 2 apresenta um desempenho melhor, pois não há variação no tempo de resposta entre os dois VCVSIs. Na configuração 3, pelo fato de o VCVSI ter que lidar com toda a variação inicial de potência, os picos de potência, durante os transitórios, podem ser elevados. Por isso, ao implementar essa configuração na microrrede, é importante levar em consideração a proporção das potências absorvidas ou fornecidas pelos CCVSI durante o compartilhamento e a potência nominal dos VCVSIs, a fim de evitar sobrecarregamentos neste último.

A configuração 3, embora não alcance o mesmo desempenho da configuração 2, oferece algumas vantagens que a tornam indispensável no controle de microrredes ilhadas. Muitos VSIs não são projetados para operar como um VCVSI, portanto, fazer um CCVSI operar com um controle droop reverso utilizando CLPs é uma abordagem conveniente para o VSI participar no compartilhamento de potência e na regulação da frequência da rede e, conseqüentemente, deixar a rede mais estável.

6.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como recomendações para trabalhos futuros, destacam-se alguns desdobramentos que podem dar continuidade a este trabalho. A seguir:

1. Controle secundário descentralizado – controle secundário tem a função de corrigir os erros provenientes do controle primário, ou seja, desvios de tensão e frequência inerentes ao controle droop. O controle precisa ser realizado sem a troca de comunicação entre os inversores para seguir com a ideia de manter a robustez e segurança à microrrede.

2. Controle hierárquico com o sistema de gerenciamento de energia – O presente trabalho focou apenas com o controle primário. Uma boa direção para futuros trabalhos seria a implementação de todos os níveis de controles necessários para a operação ilhada da microrrede, considerando a transição do modo ilhado para conectado e vice-versa. A camada primária precisa ser descentralizada. Quanto às camadas superiores, podem ser realizadas com o uso de comunicação. A terceira camada pode ser um controle centralizado com um sistema gerenciamento de energia responsável pelo despacho econômico da microrrede.

3. Controle descentralizado droop na presença de cargas não lineares – As cargas conectadas em uma microrrede podem ser lineares e não lineares. Cargas não lineares deterioram a qualidade da energia ao extrair correntes harmônicas. O estudo testaria o desempenho do controle na presença de cargas não lineares e em estratégias para a mitigação das possíveis complicações.

REFERÊNCIAS

- AHMAD, M. W.; MOURSHED, M.; MUNDOW, D.; SISINNI, M.; REZGUI, Y. Building energy metering and environmental monitoring - A state-of-the-art review and directions for future research. **Energy and Buildings**, v. 120, p. 85–102, 2016.
- AHMETHODZIC, L.; MUSIC, M. Comprehensive review of trends in microgrid control. **Renewable Energy Focus**, v. 38, p. 84–96, 2021. Elsevier Ltd. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ref.2021.07.003>>.
- ALFERGANI, A.; ALFAITORI, K. A.; KHALIL, A.; BUAOSSA, N. Control strategies in AC microgrid: A brief review. In: International Renewable Energy Congress, IREC, 9, 2018, Hammamet. **Anais...** Hammamet, Tunisia, 2018, pp. 1-6.
- ALI, Z.; CHRISTOFIDES, N.; HADJIDEMETRIOU, L.; KYRIAKIDES, E.; YANG, Y.; BLAABJERG, F. Three-phase phase-locked loop synchronization algorithms for grid-connected renewable energy systems: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 90, p. 434–452, 2018.
- ANDISHGAR, M. H.; GHOLIPOUR, E.; HOOSHMAND, R. ALLAH. An overview of control approaches of inverter-based microgrids in islanding mode of operation. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 80, p. 1043–1060, 2017. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.267>>.
- ARAIA, J.; TAGUCHI, Y. Coordinated control between a grid forming inverter and grid following inverters supplying power in a standalone microgrid. **Global Energy Interconnection**, v. 5, n. 3, p. 259–265, 2022. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.gloe.2022.06.002>>.
- CHANDORKAR, M. C.; DIVAN, D. M.; ADAPA, R. Control of parallel connected inverters in standalone ac supply systems. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 29, n. 1, p. 136–143, 1993.
- DE BRABANDERE, K.; BOLSENS, B.; VAN DEN KEYBUS, J.; WOYTE, A.; DRIESEN, J.; BELMANS, R. A voltage and frequency droop control method for parallel inverters. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 22, n. 4, p. 1107–1115, jul. 2007.
- DU, W.; TUFFNER, FRANCIS K.; SCHNEIDER, K. P.; LASSETER, R. H. XIE, J.; CHEN, Z.; BHATTARAI, B.; SCHNEIDER, K. P.; LASSETER, R. H.; XIE, J.; CHEN, Z. Modeling of Grid-Forming and Grid-Following Inverters for Dynamic Simulation of Large-Scale Distribution Systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 36, n. 4, p. 2035–2045, 2021.
- EPE. Balanço energético nacional 2023: Ano base 2022. EPE. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2023>>.

GOLESTAN, S.; GUERRERO, J. M.; VASQUEZ, J. C. Three-Phase PLLs: A Review of Recent Advances. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 32, n. 3, p. 1894–1907, 2017. IEEE.

GUERRERO, J. M.; CHANDORKAR, M.; LEE, T. L. LOH, P. C. Advanced control architectures for intelligent microgrids part i: Decentralized and hierarchical control. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 60, n. 4, p. 1254–1262, 2013.

GUERRERO, J. M.; VASQUEZ, J. C.; MATAS, J.; DE VICUÑA, L. G.; CASTILLA, M. Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids - A general approach toward standardization. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 58, n. 1, p. 158–172, 2011.

GUERRERO, J. M.; DE VICUÑA, L. G.; MATAS, J.; MIRET, J.; CASTILLA, M. Output impedance design of parallel-connected UPS inverters. **IEEE International Symposium on Industrial Electronics**, v. 2, n. 4, p. 1123–1128, 2004.

GUERRERO, J. M.; BERBEL, N.; MATAS, J.; SOSA, J. L.; CRUZ, J.; ALENTORN, A. Decentralized control for parallel operation of distributed generation inverters in microgrids using resistive output impedance. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 54, n. 2, p. 994–1004, 2007.

GURULE, N. S.; ALVIDREZ, J. H.; RENO, M. J.; DU, W.; SCHNEIDER, K. Grid-Forming and Grid-Following Inverter Comparison of Droop Response. In: IEEE Photovoltaics Specialists Conference (PVSC), 49, 2022, Philadelphia. **Anais...** PA, USA, 2022, pp. 0190-0196.

HASAN, M.; MIFTA, Z.; SALSABIL, N. A.; PAPIYA, S. J.; HOSSAIN, M.; ROY, P.; CHOWDHURY, N. U. R.; FARROK, O. A critical review on control mechanisms, supporting measures, and monitoring systems of microgrids considering large scale integration of renewable energy sources. **Energy Reports**, v. 10, p. 4582–4603, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.11.025>>.

HIRSCH, A.; PARAG, Y.; GUERRERO, J. M. Microgrids: A review of technologies, key drivers, and outstanding issues. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 90, p. 402–411, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.040>>.

IEA (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY). Renewables 2023: Analysis and forecasts to 2028. Paris. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/renewables-2023>>.

KULKARNI, S. V.; GAONKAR, D.N. An investigation of PLL synchronization techniques for distributed generation sources in the grid-connected mode of operation. **Electric Power Systems Research**, v. 223, p. 1–12, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.epsr.2023.109535>>.

LEILA, A.; HASSAN, E. F.; FOUAD, G.; AHMED-ALI, T. Power Sharing and Parallel Inverters Control in Islanded Microgrids. In: International Symposium on Advanced Electrical and Communication Technologies, ISAECT, 4, 2021, Alkhobar. **Anais...** Alkhobar, Saudi Arabia, 2021, p. 1-6: IEEE.

KIKUSATO, H.; ORIHARA, D.; HASHIMOTO, J.; TAKAMATSU, T.; OOZEKI, T.; MATSUURA, T.; MIYAZAKI, S.; HAMADA, H.; MIYAZAKI, T. Performance evaluation of grid-following and grid-forming inverters on frequency stability in low-inertia power systems by power hardware-in-the-loop testing. **Energy Reports**, v. 9, p. 381–392, 2023.

MOHAMMED, N.; LASHAB, A.; CIOBOTARU, M.; GUERRERO, J. M. Accurate Reactive Power Sharing Strategy for Droop-Based Islanded AC Microgrids. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 70, n. 3, p. 2696–2707, 2023. IEEE.

MOUSAVI, S. Y. M.; JALILIAN, A.; SAVAGHEBI, M.; GUERRERO, J. M. Autonomous Control of Current-and Voltage-Controlled DG Interface Inverters for Reactive Power Sharing and Harmonics Compensation in Islanded Microgrids. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 33, n. 11, p. 9375–9386, 2018.

PATTABIRAMAN, D.; LASSETER, R. H.; JAHNS, T. M. Comparison of grid following and grid forming control for a high inverter penetration power system. In: 2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), 2018, Portland. **Anais... Portland, OR, USA, 2018**, pp. 1-5.

PELACINI, D. A. F.; KASPER, J. V. G.; AQUINO, C. C. C. B. DE; JOÃO A. VILELA, J.; OLIVEIRA, G. H. C. Análise de Microrrede Ilhada Utilizando Inversores em Paralelo com Droop. **Sociedade Brasileira de Automática (SBA)**, v. 1, n. 1, 2020.

RAJESH, K. S.; DASH, S. S.; RAJAGOPAL, R.; SRIDHAR, R. A review on control of ac microgrid. **Renewable and sustainable ...**, v. 71, p. 814–819, 2017.

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

ROKROK, E.; GOLSHAN, M. E. H. Adaptive voltage droop scheme for voltage source converters in an islanded multibus microgrid. **IET Generation, Transmission and Distribution**, v. 4, n. 5, p. 562–578, 2010.

ROKROK, E.; SHAFIE-KHAH, M.; CATALÃO, J. P. S. Dedução de droop convencional. Review of primary voltage and frequency control methods for inverter-based islanded microgrids with distributed generation. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, p. 3225–3235, 2018.

ROSINI, A.; LABELLA, A.; BONFIGLIO, A.; PROCOPIO, R.; GUERRERO, J. M. Grid feeding and grid forming: A review of reactive power sharing control techniques for islanded microgrids. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 141, 2021.

SADEQUE, F.; SHARMA, D.; MIRAFZAL, B. Power-Sharing between Grid-Forming and Grid-Following Inverters. In: 2021 IEEE 22nd Workshop on Control and Modelling of Power Electronics, COMPEL, 2021, Cartagena. **Anais... Cartagena, Colombia, 2021**, pp. 1-5.

SHOEIBY, B.; DAVOODNEZHAD, R.; HOLMES, D. G.; MCGRATH, B. P. A new current control droop strategy for VSI-based islanded microgrids. In: 2014 International Power Electronics Conference, IPEC-Hiroshima - ECCE Asia 2014, Hiroshima. **Anais...** Hiroshima, Japan, 2014, pp. 1482-1489: IEEE.

TAMBOLI, S.; RAWALE, S.; THORAJET, R; AGASHE, S. Implementation of Modbus RTU and Modbus TCP communication using Siemens S7-1200 PLC for batch process. In: 2015 International Conference on Smart Technologies and Management for Computing, Communication, Controls, Energy and Materials (ICSTM), 2015, Avadi. **Anais...** Avadi, India, 2015, pp. 258-263.

TEMBO, G. Overview of the Microgrid Concept and its Hierarchical Control Architecture. **International Journal of Engineering Research & Technology**, v. 5, n. 03, p. 50–55, 2016.

TULADHAR, A.; JIN, H.; UNGER, T.; MAUCH, K. Control of parallel inverters in distributed AC power systems with consideration of line impedance effect. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 36, n. 1, p. 131–138, 2000.

VERBE, S. C.; SHIGENOBU, R.; ITO, M. Comparative Study of GFM-grid and GFL-grid in Islanded Operation. In: 2021 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia). 2021, Brisbane. **Anais...** Brisbane, Australia, 2021, pp. 1-5.

VIJAY, A. S.; PARTH, N.; DOOLLA, S.; CHANDORKAR, M. C. An Adaptive Virtual Impedance Control for Improving Power Sharing among Inverters in Islanded AC Microgrids. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 12, n. 4, p. 2991–3003, 2021. IEEE.

VILLA, A.; BELLONI, F.; CHIUMEIO, R.; GANDOLFI, C. Conventional and reverse droop control in islanded microgrid: Simulation and experimental test. In: 2016 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, SPEEDAM, 2016, Capri. **Anais...** Capri, Italy, 2016, pp. 288-294: IEEE.

VINAYAGAM, A.; SWARNA, K. S. V.; KHOO, S. Y; OO, A. T.; STOJCEVSKI, A. PV Based Microgrid with Grid-Support Grid-Forming Inverter Control-(Simulation and Analysis). **Smart Grid and Renewable Energy**, v. 08, n. 01, p. 1–30, 2017.

WANG, S.; LIU, Z.; LIU, J.; AN, R.; XIN, M. Breaking the boundary: A droop and master-slave hybrid control strategy for parallel inverters in islanded microgrids. In: 2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE, 2017, Cincinnati. **Anais ...** Cincinnati, OH, USA, 2017. p.3345–3352.

WANG, S.; LIU, Z.; LIU, J.; et al. Modeling and analysis of droop-based hybrid control strategy for parallel inverters in islanded microgrids. In: IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition – APEC, 2017, Tampa. **Anais...** Tampa, FL, USA: IEEE, 2017.

WANG, X.; LI, Y. W.; BLAABJERG, F.; LOH, P. C. Virtual-Impedance-Based Control for Voltage-Source and Current-Source Converters. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 30, n. 12, p. 7019–7037, 2015. IEEE.

WU, D.; TANG, F.; DRAGICEVIC, T.; VASQUEZ, J. C.; GUERRERO, J. M. Autonomous active power control for islanded AC microgrids with photovoltaic generation and energy storage system. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 29, n. 4, p. 882–892, 2014.

WU, D.; TANG, F.; VASQUEZ, J. C.; GUERRERO, J. M. Control and analysis of droop and reverse droop controllers for distributed generations. In: 2014 IEEE 11th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices, SSD, 2014, Barcelona. **Anais ...** Barcelona, Spain: IEEE, 2014.

YAMASHITA, D. Y.; VECHIU, I.; GAUBERT, J. P. A review of hierarchical control for building microgrids. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 118, p. 1-18, 2020. Elsevier Ltd. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109523>>.

YANG, J.; YUAN, W.; SUN, Y.; HAN, H.; HOU, X.; GUERRERO, J. M. A novel quasi-master-slave control frame for PV-storage independent microgrid. **International Journal of Electrical Power and Energy Systems**, v. 97, p. 262–274, 2018.

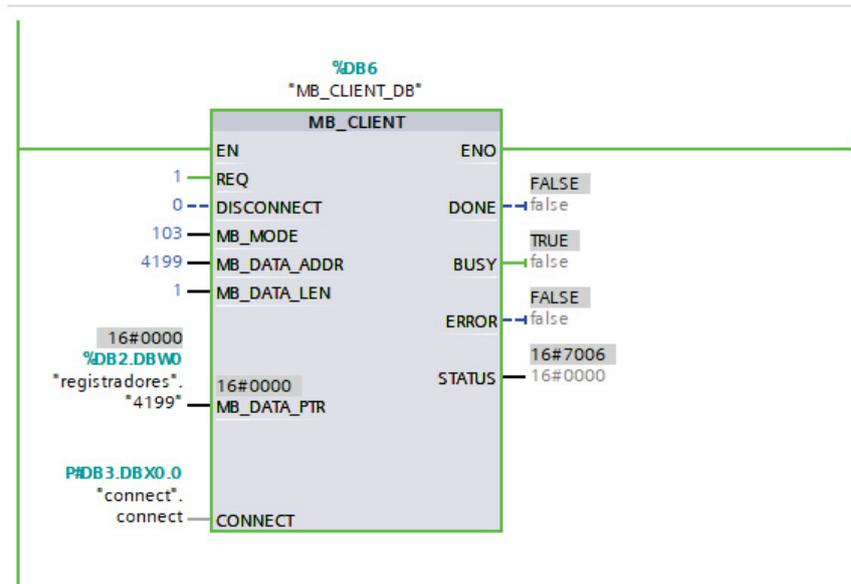
ZHONG, Q. C.; ZENG, Y. Universal Droop Control of Inverters with Different Types of Output Impedance. **IEEE Access**, v. 4, p. 702–712, 2016.

ZUO, Y.; YUAN, Z.; SOSSAN, F.; ZECCHINO, A.; CHERKAOUI, R.; PAOLONE, M. Performance assessment of grid-forming and grid-following converter-interfaced battery energy storage systems on frequency regulation in low-inertia power grids ☆. **Sustainable Energy, Grids and Networks**, v. 27, p. 1-11, 2021.

APÊNDICE 1 – PARÂMETROS DO CONTROLE DROOP E SEUS REGISTRADORES MODBUS

Para a comunicação Modbus TCP (servidor/cliente) o software Tia-portal da Siemens fornece duas instruções MB-SERVER e MB-CLIENT. A implementação do bloco MB-CLIENT no Tia-portal é mostrada na FIGURA 25.

FIGURA 25 – PARÂMETROS DO MB_CLIENT



FONTE: O autor (2024).

Onde, a entrada REQ controla a solicitação de comunicação Modbus; DISCONNECT controla o estabelecimento e encerramento da conexão com o servidor Modbus; MB_MODE seleciona o modo de solicitação Modbus (leitura, gravação ou diagnóstico) ou seleção direta de uma função Modbus; MB_DATA_ADDR é uma entrada para o registro a ser lido/alterado no servidor; MB_DATA_LEN representa o número de bits a ser tratado pela solicitação; MB_DATA_PR, representa o endereço de armazenamento dos dados trocados com o servidor; CONNECT, represente um ponteiro estrutura de conexão, inclui todos os parâmetros do endereço necessário para estabelecer a comunicação com o servidor. O que inclui o endereço IP e o ID do servidor.

APÊNDICE 2 – PARÂMETROS DO CONTROLE DROOP E SEUS REGISTRADORES MODBUS

QUADRO 8 – PARÂMETROS DO CONTROLE DROOP P-F CONFIGURADOS NO INVERSOR.

Parametros	Descrição	Unidade	Faixa de ajuste		Registrador Modbus
			Mínimo	Máximo	
DroopkP	O parâmetro influencia a inclinação da curva característica do controle droop de frequência	% de fN/PN	0.1	4	4236
Flin	Frequência de linearização	Hz	-5	5	4236
F_lin. Max. Neg.	Limite negativo de frequência linearização	Hz	-6	6	4238
F_lin. min. Pos	Limite positivo de frequência linearização	Hz	-6	6	4239

FONTE: O autor (2024).

QUADRO 9 – PARÂMETROS DO CONTROLE DROOP Q-V CONFIGURADOS NO INVERSOR.

Parâmetro	Descrição	Unidade	Faixa de ajuste		Endereço Modbus
			Mínimo	Máximo	
DroopkQ	O parâmetro influencia na inclinação da curva do controle droop de tensão	% de VN/QN	0.1	10	4237
Fator de ajuste de tensão	Especifica o valor de referência de tensão	% de Vnom	75	120	4237
Mínimo fator de tensão	Tensão mínima como percentagem	% de Vnom	75	120	4240
Máximo fator de tensão	Tensão máxima como percentagem	% de Vnom	75	120	4241

FONTE: O autor (2024).