



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

CAIO LUCAS NASCIMENTO SILVA

ANÁLISE DE ESTRATÉGIAS DE CONTROLE DE RECURSOS ENERGÉTICOS
DISTRIBUÍDOS UTILIZANDO CO-SIMULAÇÃO

FORTALEZA

2025

CAIO LUCAS NASCIMENTO SILVA

ANÁLISE DE ESTRATÉGIAS DE CONTROLE DE RECURSOS ENERGÉTICOS
DISTRIBUÍDOS UTILIZANDO CO-SIMULAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Lucas Silveira
Melo

FORTALEZA

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- S579a Silva, Caio Lucas Nascimento.
Análise de estratégias de controle de recursos energéticos distribuídos utilizando co-simulação / Caio Lucas Nascimento Silva. – 2025.
57 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2025.
Orientação: Prof. Dr. Lucas Silveira Melo.
1. Co-Simulação. 2. Redes Elétricas Inteligentes. 3. Recursos Energéticos Distribuídos. 4. OpenDER.
5. Mosaik. I. Título.

CDD 621.3

CAIO LUCAS NASCIMENTO SILVA

ANÁLISE DE ESTRATÉGIAS DE CONTROLE DE RECURSOS ENERGÉTICOS
DISTRIBUÍDOS UTILIZANDO CO-SIMULAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Lucas Silveira Melo (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profa. PhD. Ruth Pastôra Saraiva Leão
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profa. Dra. Raquel Cristina Filiagi Gregory
Universidade Federal do Ceará (UFC)

À Deus, por todas as graças e benefícios. Mãe, por todo o apoio e atenção durante toda a minha vida. A minha Noiva pelo incentivo e suporte durante essa caminhada.

AGRADECIMENTOS

A Nosso Senhor Jesus Cristo, por todas as graças, dons e benefícios recebidos. A Santíssima Virgem Maria pela sua intercessão diária.

A minha querida Mãe, por todo o amor, cuidado e suporte recebidos durante a minha vida, especialmente na faculdade em que não me deixou desistir.

A minha amada Noiva pelo carinho, atenção e apoio durante essa caminhada, por todos os seus incentivos e disponibilidade para me ajudar.

A minha madrinha Genecy, minha tia Cristiane e tio João Batista por todo o suporte dado durante a minha caminhada na faculdade.

A toda a minha família por todo o carinho durante minha vida.

Ao meu caro orientador Prof. Dr. Lucas Silveira Melo, por todos os ensinamentos, atenção e suporte, tanto durante a bolsa de iniciação científica quanto na elaboração do TCC.

Ao aluno Gabriel Pinheiro do curso de engenharia elétrica da Universidade Estadual do Ceará que foi meu companheiro de equipe e me ajudou muito durante as disciplinas.

Ao aluno Emanuel Mota do curso de engenharia elétrica da Universidade Estadual do Ceará que sempre esteve disponível para me ajudar durante a faculdade.

Ao Doutorando em Engenharia Elétrica, Ednardo Moreira Rodrigues, e seu assistente, Alan Batista de Oliveira, aluno de graduação em Engenharia Elétrica, pela adequação do *template* utilizado neste trabalho para que o mesmo ficasse de acordo com as normas da biblioteca da Universidade Federal do Ceará (UFC).

Agradeço a todos os professores por todas as aulas, trabalhos e atenção.

“Haveis de ter aflições no mundo; mas tende
confiança, eu venci o mundo.”

(Jesus Cristo)

RESUMO

O crescente aumento da penetração de Recursos Energéticos Distribuídos (REDs) na rede elétrica de distribuição vem causando grandes modificações no sistema elétrico brasileiro. O sistema elétrico tradicionalmente foi planejado para lidar com o fluxo unidirecional de energia, de forma que não estava preparado para lidar com a inserção massiva de Geração Distribuída (GD), o que ocasionou problemas de fluxo reverso nos alimentadores, atuação indevida de equipamentos e, principalmente, situações de sobretensão. Visando mitigar estes problemas, soluções de controle foram desenvolvidas, como o controle Volt-Watt e o controle Volt-Var. Essas modificações têm como consequência a transição do sistema elétrico tradicional para o conceito de Redes Elétricas Inteligentes (REIs). Por conta da complexidade de representar de forma coerente uma REI, os simuladores convencionais podem não ser suficientes para uma representação holística do sistema, sendo necessária a integração de diferentes simuladores em um ambiente de co-simulação para o estudo do sistema. Diante dessa situação, o presente trabalho tem como objetivo realizar uma análise comparativa das estratégias de controle Volt-Var e Volt-Watt em uma rede elétrica de distribuição com presença de geração fotovoltaica e inversores inteligentes, utilizando co-simulação. A co-simulação é orquestrada pelo Mosaik, com a rede elétrica modelada no Pandapower e as funções de controle dos inversores inteligentes implementadas pelo OpenDER, garantindo conformidade com os requisitos do padrão IEEE 1547-2018. A rede elétrica de distribuição analisada, obtida da base de dados SimBench, possui 97 barras, tensão de linha de 400 V, característica radial e originalmente conta com 8 barras com geração fotovoltaica. Para criar um cenário de estresse na rede elétrica, são adicionadas 48 novas instalações fotovoltaicas. Os resultados da co-simulação demonstraram a efetividade dos controles em mitigar o problema de sobretensão, com uma redução superior a 80% no valor da função de desvio de tensão, estabelecida como métrica, além de evidenciarem as vantagens e desvantagens de cada abordagem. Dessa forma, o presente trabalho demonstrou a relevância da utilização da co-simulação para o estudo de REIs, com o ambiente modelado apresentando resultados satisfatórios e coerentes, proporcionando uma análise eficiente dos diferentes controles aplicados à rede.

Palavras-chave: Co-Simulação. Redes Elétricas Inteligentes. Recursos Energéticos Distribuídos. Controle Volt-Watt. Controle Volt-Var. OpenDER. Mosaik.

ABSTRACT

The growing penetration of Distributed Energy Resources (DERs) in the electricity distribution network is causing major changes in the Brazilian power system. The electrical system was traditionally designed to handle unidirectional energy flow and was therefore not prepared for the massive integration of Distributed Generation (DG), which has led to reverse power flow in feeders, improper operation of equipment, and, most notably, overvoltages. To mitigate these issues, control strategies such as Volt-Watt and Volt-Var have been developed. These changes have resulted in the transition from the traditional electrical system to the concept of Smart Grids (SGs). Due to the complexity of coherently representing an SG, conventional simulators may be insufficient for a holistic analysis of the system, requiring the integration of multiple simulators in a co-simulation environment. In this context, this study aims to conduct a comparative analysis of Volt-Var and Volt-Watt control strategies in an electrical distribution network with photovoltaic generation and smart inverters, using co-simulation. The co-simulation is orchestrated by Mosaik, with the electrical network modeled in Pandapower and the smart inverter control functions implemented using OpenDER, ensuring compliance with the IEEE 1547-2018 standard. The analyzed distribution network, obtained from the SimBench database, consists of 97 buses, a line voltage of 400 V, a radial topology, and initially includes 8 buses with photovoltaic generation. To simulate a stressed condition in the electrical network, 48 additional photovoltaic installations are introduced. The co-simulation results demonstrated the effectiveness of the control strategies in mitigating overvoltages, with a reduction of more than 80% in the voltage deviation function, used as a performance metric, while also highlighting the strengths and limitations of each approach. Thus, this study demonstrates the relevance of co-simulation for Smart Grid analysis, with the modeled environment producing satisfactory and consistent results, enabling an effective evaluation of the control strategies applied to the grid.

Keywords: Co-Simulation. Smart Grids. Distributed Energy Resources. Volt-Watt Control. Volt-Var Control. OpenDER. Mosaik.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Projeção do número de consumidores residenciais e comerciais de baixa tensão com Geração Distribuída na área de concessão da distribuidora ENEL Ceará.	15
Figura 2 – Rede elétrica tradicional.	16
Figura 3 – Rede elétrica com inversão de fluxo de energia.	16
Figura 4 – Curva característica do controle Volt-Watt.	25
Figura 5 – Curva característica do controle Volt-Var.	28
Figura 6 – Estrutura do Mosaik.	33
Figura 7 – Diagrama geral de blocos do OpenDER.	35
Figura 8 – Rede elétrica obtida do SimBench	37
Figura 9 – Esquemático da co-simulação.	39
Figura 10 – Rede elétrica analisada com a indicação dos pontos monitorados	41
Figura 11 – Curva Volt-Watt utilizada na co-simulação.	42
Figura 12 – Curva Volt-Var utilizada na co-simulação.	43
Figura 13 – Comparação da tensão ao longo do tempo para as barras monitoradas entre o caso da rede original e o caso da rede com GD adicional.	44
Figura 14 – Comparação do carregamento em percentual ao longo do tempo para as linhas monitoradas entre o caso da rede original e o caso da rede com GD adicional.	45
Figura 15 – Comparação da tensão ao longo do tempo para as barras monitoradas entre o caso da rede sem controle e a rede com o controle Volt-Watt aplicado.	46
Figura 16 – Comparação da potência ativa (W) ao longo do tempo para as barras monitoradas entre o caso da rede sem controle e a rede com o controle Volt-Watt aplicado.	47
Figura 17 – Comparação do carregamento percentual da linha ao longo do tempo entre o caso da rede sem controle e a rede com o controle Volt-Watt aplicado.	48
Figura 18 – Comparação da tensão ao longo do tempo para as barras monitoradas entre o caso da rede sem controle e a rede com o controle Volt-Var aplicado.	49
Figura 19 – Comparação da potência ativa (W) ao longo do tempo para as barras monitoradas entre o caso da rede sem controle e a rede com o controle Volt-Var aplicado.	50

Figura 20 – Comparação do carregamento percentual da linha ao longo do tempo entre o caso da rede sem controle e a rede com o controle Volt-Var aplicado. 51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Requisitos de controle por categoria do RED segundo o IEEE 1547-2018.	24
Tabela 2 – Parâmetros definidos para o controle Volt-Watt pelo IEEE 1547-2018.	25
Tabela 3 – Parâmetros definidos para o controle Volt-Var (categoria B) conforme IEEE 1547-2018.	28
Tabela 4 – Dados da Rede Elétrica utilizada.	37
Tabela 5 – Parâmetros Nominiais do Inversor Utilizado.	40
Tabela 6 – Análise dos valores da função desvio de tensão para as barras monitoradas (Controle Volt-Watt).	46
Tabela 7 – Comparação da energia líquida injetada durante o período de co-simulação, considerando as condições com e sem controle ativo nas barras monitoradas (Controle Volt-Watt).	47
Tabela 8 – Análise do carregamento máximo das linhas monitoradas, com e sem controle ativo (Controle Volt-Watt).	48
Tabela 9 – Análise dos valores da função desvio de tensão para as barras monitoradas (Controle Volt-Var).	49
Tabela 10 – Comparação da energia líquida injetada durante o período de co-simulação, considerando as condições com e sem controle ativo nas barras monitoradas (Controle Volt-Var).	50
Tabela 11 – Análise do carregamento máximo das linhas monitoradas, com e sem controle ativo (Controle Volt-Var).	51
Tabela 12 – Redução percentual dos valores da função desvio de tensão para os controles Volt-Watt e Volt-Var.	51
Tabela 13 – Redução percentual da energia líquida injetada para os controles Volt-Watt e Volt-Var.	52
Tabela 14 – Comparação do carregamento máximo das linhas monitoradas, sem controle e com os controles Volt-Watt e Volt-Var.	52

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

API	Interface de Programação de Aplicação
BESS	Battery Energy Storage System
EPRI	Electric Power Research Institute
FMI	Functional Mock-up Interface
GD	Geração Distribuída
GREI	Grupo de Redes Elétricas Inteligentes
HLA	High Level Architecture
kWh	quilowatt-hora
pu	por unidade
RED	Recursos Energéticos Distribuídos
REI	Rede Elétrica Inteligente
UFC	Universidade Federal do Ceará

SUMÁRIO

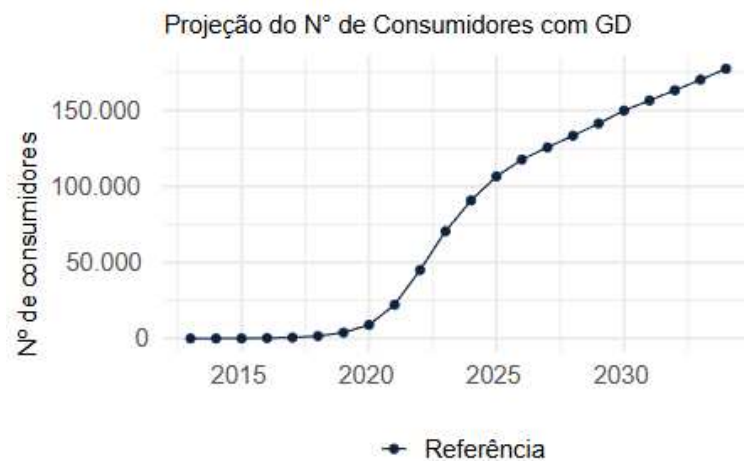
1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Justificativa	18
1.2	Objetivos	18
<i>1.2.1</i>	<i>Objetivo Geral</i>	<i>18</i>
<i>1.2.2</i>	<i>Objetivos Específicos</i>	<i>19</i>
1.3	Organização do trabalho	19
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1	Co-Simulação	20
2.2	Recursos Energéticos Distribuídos	21
2.3	Inversores Inteligentes	23
2.4	Controle Volt-Watt	24
2.5	Controle Volt-Var	26
3	MATERIAIS E MÉTODOS	30
3.1	Ferramentas Computacionais	30
<i>3.1.1</i>	<i>Python</i>	<i>30</i>
<i>3.1.2</i>	<i>Pandapower</i>	<i>30</i>
<i>3.1.3</i>	<i>Mosaik</i>	<i>31</i>
<i>3.1.4</i>	<i>SimBench</i>	<i>33</i>
<i>3.1.5</i>	<i>OpenDER</i>	<i>34</i>
3.2	Metodologia e Estrutura da Co-Simulação	36
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
4.1	Definição do Cenário	40
4.2	Parâmetros do Controle Volt-Watt	41
4.3	Parâmetros do Controle Volt-Var	42
4.4	Métricas de Avaliação	43
4.5	Análise e Discussão dos Resultados	44
<i>4.5.1</i>	<i>Análise do Impacto da inserção adicional de GD</i>	<i>44</i>
<i>4.5.2</i>	<i>Análise do controle Volt-Watt</i>	<i>45</i>
<i>4.5.3</i>	<i>Análise do controle Volt-Var</i>	<i>48</i>
<i>4.5.4</i>	<i>Discussão Comparativa</i>	<i>51</i>

5	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	54
	REFERÊNCIAS	56

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, tem-se observado um grande aumento da penetração de Geração Distribuída (GD) no sistema de distribuição de energia elétrica brasileiro. Na Figura 1 é apresentado o aumento do número de consumidores com geração distribuída e também a projeção estimada para os próximos 5 anos do número de consumidores residenciais e comerciais de baixa tensão com GD para a área de concessão da distribuidora ENEL Ceará.

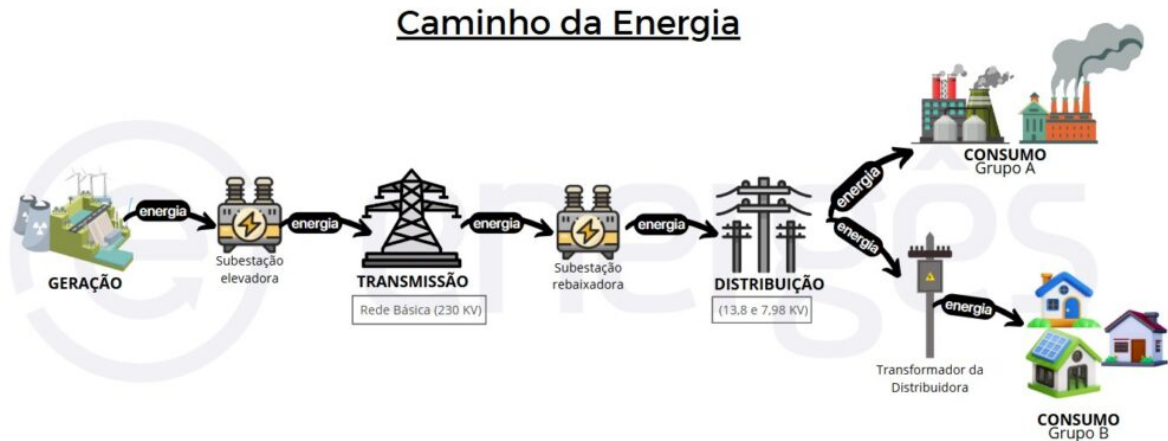
Figura 1 – Projeção do número de consumidores residenciais e comerciais de baixa tensão com Geração Distribuída na área de concessão da distribuidora ENEL Ceará.



Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (2024).

O sistema elétrico nacional foi planejado originalmente considerando a configuração de rede com a geração em uma extremidade e a carga na outra, como apresentado na Figura 2. Porém, com a inserção da GD, ocorreu uma mudança na configuração do sistema, ocasionando problemas.

Figura 2 – Rede elétrica tradicional.



Fonte: Energes (2024).

Equipamentos como reguladores de tensão, transformadores de distribuição, relés de proteção e bancos de capacitores são afetados por essa mudança, principalmente pela questão da sobretensão e da inversão do fluxo de energia, ambas causadas por uma descompensação local entre carga e geração (HUANG *et al.*, 2019). Na Figura 3 é representado o problema da inversão de fluxo de energia. Os equipamentos, projetados para operar em um determinado nível de tensão, acabam sendo submetidos a níveis de tensão elevados, o que pode ocasionar seu sobreaquecimento e levar a operações indevidas no caso de relés e reguladores de tensão, resultando na redução da vida útil desses equipamentos.

Figura 3 – Rede elétrica com inversão de fluxo de energia.



Fonte: Energes (2024).

Dessa forma, fez-se necessário o desenvolvimento de estratégias de controle para a mitigação desse problema, soluções que podem ser associadas a cada inversor em particular, caracterizando um controle local, cuja principal vantagem é a independência de dispositivos de comunicação externos para sua operação (JHA; DUBEY, 2019).

Entre as soluções de controle, podemos citar a estratégia Volt-Watt (tensão-potência ativa) em que o inversor recebe a leitura de tensão em um ponto da rede e, a partir dessa leitura, realiza um corte na potência ativa injetada na rede, visando diminuir o nível de tensão no ponto de medição (CARLETTE; FALCÃO, 2021). Contudo, para o proprietário do inversor, esse corte de potência ativa é indesejado, já que reduz o retorno financeiro do investimento.

Outra estratégia de controle utilizada é a Volt-Var, que consiste também em o inversor receber a leitura da magnitude de tensão em um ponto de interesse e, a partir dessa leitura, realiza a injeção ou absorção de potência reativa na rede (OLIVEIRA *et al.*, 2023).

Por conta das dificuldades associadas ao teste em campo dessas soluções, visando a validação desses métodos de controle, faz-se necessário o uso de plataformas de simulação. Existe hoje disponível no mercado uma ampla gama de softwares disponíveis para a simulação de redes elétricas, porém, devido à alta complexidade da rede, principalmente no contexto de REIs, ocorrem situações em que apenas um software não aborde todos os domínios desejados para a simulação.

Nesse contexto, surge a possibilidade de utilização de mais de um simulador para representar um cenário de simulação. Porém, ocorrem certas dificuldades associadas a essa integração, principalmente quando as ferramentas possuem contextos de simulação diferentes, simuladores de tempo contínuo e à eventos discretos, por exemplo. Visando essa integração, foram desenvolvidos sistemas de co-simulação, que são responsáveis por gerir a execução e a troca de dados entre os diferentes simuladores do cenário, garantindo assim uma simulação coerente e que aborde diferentes domínios, levando a um resultado preciso (PAULA, 2022).

Nesse panorama, temos a plataforma Mosaik (OFENLOCH *et al.*, 2020) como uma solução. Essa ferramenta de co-simulação foi construída visando justamente o domínio de redes elétricas inteligentes, fornecendo diversas ferramentas para a modelagem de ambientes complexos de co-simulação.

1.1 Justificativa

Por conta do aumento da complexidade da rede elétrica e do desenvolvimento das REIs, o sistema elétrico vem, cada vez mais, envolvendo, em sua composição, diferentes domínios, como geração distribuída, redes de comunicação, agentes inteligentes e sistemas de controle. Visando o desenvolvimento e a validação desse sistema (principalmente de estratégias de controle), faz-se necessário o uso de softwares que representem, de forma fidedigna, cada um dos componentes da rede de interesse.

Considerando esses diferentes domínios e buscando uma simulação holística, isto é, abrangente, é necessária a combinação de diferentes simuladores para o estudo. Visando a integração dos simuladores e um cenário de simulação preciso, faz-se relevante a utilização de ferramentas de co-simulação; entre as opções de ferramentas existentes, o Mosaik é uma das mais promissoras para a aplicação desse trabalho. É de grande interesse a modelagem de um sistema de co-simulação de uma rede elétrica inteligente utilizando essa ferramenta, já que ela possui código-fonte aberto e foi construída em um contexto de sistemas de energia.

O ambiente de co-simulação desenvolvido no Mosaik também proporciona uma estrutura modular e facilidade de integração de novas ferramentas. Esse ambiente permite uma grande facilidade na sua modificação, sendo possível, de forma simples, alterar, por exemplo, a rede utilizada na simulação, a estratégia de controle aplicada e até mesmo os simuladores utilizados.

Portanto, fica evidente a relevância de modelar um ambiente de co-simulação no Mosaik, inicialmente desenvolvendo o ambiente para um domínio (elétrico) e utilizando esse ambiente para validar estratégias de controle em inversores, porém já sendo essa plataforma preparada para a integração de outros domínios de interesse em trabalhos futuros.

1.2 Objetivos

1.2.1 *Objetivo Geral*

O presente trabalho tem como objetivo realizar uma análise comparativa das estratégias de controle Volt-Var e Volt-Watt em uma rede elétrica de distribuição com presença de geração fotovoltaica e inversores inteligentes, utilizando co-simulação.

1.2.2 *Objetivos Específicos*

- Montar um ambiente de co-simulação de uma rede elétrica de baixa tensão modular e flexível, visando a integração de outros domínios de análise em trabalhos futuros;
- Utilizar o ambiente da co-simulação para comparar as estratégias de controle aplicadas aos inversores dos painéis fotovoltaicos (Volt-Var e Volt-Watt).

1.3 Organização do trabalho

O presente trabalho está organizado em 5 capítulos, conforme descrito a seguir.

No capítulo 1 o tema é introduzido; e também são apresentadas a justificativa, os objetivos gerais e específicos, e finalmente a organização do trabalho.

No capítulo 2 é apresentada a fundamentação teórica dos seguintes assuntos: co-simulação, recursos energéticos distribuídos, inversores inteligentes, controle Volt-Watt e controle Volt-Var.

No capítulo 3, as ferramentas computacionais utilizadas no trabalho são apresentadas, assim como a metodologia e a estrutura da co-simulação.

No capítulo 4, são apresentados o cenário da co-simulação, os parâmetros dos controles Volt-Watt e Volt-Var, as métricas de avaliação dos controles, os resultados das análises e a discussão e comparação dos resultados obtidos.

Por fim, no capítulo 5 o trabalho é concluído, destacando o ambiente de co-simulação modelado, os resultados relevantes obtidos na co-simulação e identificando temas e melhorias a serem abordados em trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para o desenvolvimento do presente trabalho, foi necessário o aprofundamento nos conceitos teóricos de co-simulação, recursos energéticos distribuídos, inversores inteligentes, controle Volt-Watt e controle Volt-Var. Esses conceitos serão abordados neste capítulo.

2.1 Co-Simulação

Com os desenvolvimentos na área da computação, ocorreu o advento dos simuladores, ferramentas capazes de representar sistemas reais e reproduzir eventos, permitindo assim o aprofundamento do estudo em diversas áreas de conhecimento, entre elas a engenharia, proporcionando um grande desenvolvimento tecnológico.

Esse desenvolvimento fez com que a demanda por simuladores que representem os sistemas reais com alto grau de complexidade e que abranjam diferentes domínios aumentasse, o que acabou criando uma lacuna, já que a maioria das ferramentas de simulação são feitas com base em um domínio apenas. Nesse contexto tornou-se relevante o desenvolvimento de um ambiente de co-simulação em que diferentes simuladores possam ser integrados, visando a modelagem de um sistema com um alto grau de fidelidade.

Segundo Mihal *et al.* (2022), acoplamento de simuladores distintos, cada um executando em seu próprio ambiente de execução, é comumente definido como co-simulação. Um co-simulador permite a conexão de múltiplos simuladores de software e emuladores de hardware, possibilitando a criação de diversos cenários de simulação unificados. Dessa forma, múltiplos domínios podem ser testados e simulados de maneira transparente, como se fossem parte de um único sistema.

A montagem do ambiente de co-simulação apresenta desafios, como a dificuldade em interligar simuladores de fabricantes diferentes, já que, por motivos comerciais, esses simuladores são de código-fonte fechado, limitando assim a sua possibilidade de integração com outras ferramentas.

Existe também o problema relacionado ao passo de tempo das ferramentas de simulação que, comumente, são de dois tipos diferentes: simuladores de tempo contínuo, como os simuladores de redes elétricas, e simuladores baseados em eventos discretos, como os simuladores de redes de comunicações.

As ferramentas de co-simulação devem lidar com essas questões, sendo responsáveis

por inicializar os simuladores, gerenciar a troca de informações entre eles e gerenciar o passo de tempo da simulação, de forma a promover uma simulação holística e organizada do cenário desejado.

Como muitas vezes os simuladores utilizados na co-simulação são de diferentes desenvolvedores, é necessário que sejam estabelecidas regras para a comunicação entre as diferentes ferramentas do ambiente, de forma que todas as informações na co-simulação sejam corretamente transmitidas e compreendidas por todos os simuladores envolvidos. Segundo Mihal *et al.* (2022), para lidar com essa questão, pode ser utilizada uma abordagem que utilize modelos federados típicos da High Level Architecture (HLA), que é uma arquitetura de referência independente de domínio e um padrão voltado para a integração de diferentes simuladores e para a sincronização entre eles. Os autores também destacam o Functional Mock-up Interface (FMI), que é um padrão que permite a integração de modelos de diferentes domínios, sendo também utilizado em ferramentas de co-simulação. Adicionalmente, existem ferramentas que utilizam abordagens baseadas em sockets para a comunicação com os simuladores, como é o caso do Mosaik (OFFIS, 2025).

Uma vantagem da co-simulação é a interdependência entre os diferentes simuladores. Utilizando essa abordagem, é possível o desenvolvimento de um ambiente de simulação em que diferentes equipes trabalham em ferramentas de diferentes domínios, sem a necessidade de lidarem com a integração das diferentes ferramentas, já que a troca de informações entre os simuladores é gerenciada pela plataforma de co-simulação, facilitando assim o desenvolvimento, devido à modularidade e interdependência entre os simuladores proporcionada pelo uso dessa abordagem (GOMES *et al.*, 2017).

2.2 Recursos Energéticos Distribuídos

O sistema elétrico tem passado por grandes alterações nos últimos anos, com o desenvolvimento de novas tecnologias, como carros elétricos, painéis solares e sistemas de armazenamento de energia. Essas inovações quando conectadas às redes de distribuição são denominadas Recursos Energéticos Distribuídos (REDs).

O RED que possui um grande destaque atualmente no sistema de distribuição brasileiro é a GD, que inclui os painéis fotovoltaicos, isso devido ao grande crescimento no número de fontes de geração distribuída na rede elétrica nacional desde que a Resolução Normativa REN 482/2012 começou a vigorar (ALVES *et al.*, 2018). Essa resolução foi responsável pela regula-

mentação inicial de inserção de micro e minigeração distribuída no sistema de distribuição de energia brasileiro. Atualmente essa norma se encontra revogada e foi substituída pela Resolução Normativa ANEEL nº 1000/2021 que é complementada pela REN nº 1059/2023.

A inserção dos painéis fotovoltaicos na rede elétrica vem promovendo uma descentralização na geração da energia elétrica. O sistema, que originalmente foi projetado para contar com grandes blocos de geração a nível de transmissão, normalmente afastados dos grandes centros de carga, agora conta com geração no setor de distribuição de energia, junto às unidades consumidoras (GLEDHILL, 2023).

Segundo Gouvêa (2019), podem ser destacadas as seguintes vantagens da inserção da GD no sistema elétrico:

- Menores perdas elétricas em condições normais de operação (quando a geração não excede a carga), já que a produção é próxima ao consumidor e, dessa forma, não exige longas redes elétricas para o transporte de energia;
- Economia na fatura de energia para o consumidor que possua geração em sua residência;
- Diversificação da matriz energética, com destaque para o caráter renovável e não poluente do recurso fotovoltaico;
- Incentivo ao desenvolvimento tecnológico da rede elétrica, promovendo a pesquisa e o desenvolvimento de sistemas inteligentes de gerenciamento.

A GD também apresenta desafios, principalmente devido à natureza estocástica do recurso fotovoltaico, que implica em uma variação na injeção de potência na rede elétrica. Essa variação pode levar à instabilidade na rede e também ocasiona problemas de confiabilidade na disponibilidade da geração de energia solar. Um outro problema que vale ser citado, enfrentado pelas concessionárias de energia, é relacionado ao fluxo reverso nos alimentadores de distribuição. Esse fenômeno ocorre quando a produção de energia excede a demanda local da carga.

Com a inserção de geração ao longo do alimentador, pode ocorrer um aumento nos níveis de tensão do sistema, criando uma situação indesejada e perigosa para o funcionamento adequado da rede e, por conta de haver geração em diversos pontos, ocorre uma dificuldade no gerenciamento desses recursos.

Estratégias de controle associadas aos inversores dos painéis fotovoltaicos foram desenvolvidas para buscar mitigar os problemas apresentados, principalmente com os inversores inteligentes, que são projetados para realizar o controle da potência injetada na rede. Entre esses controles, temos o Volt-Watt e o Volt-Var.

2.3 Inversores Inteligentes

Para a integração da geração fotovoltaica com a rede elétrica, faz-se necessário o uso de inversores para realizar a conversão da corrente contínua para corrente alternada. Os inversores são parte fundamental da integração da GD no sistema elétrico; eles são responsáveis pela eficiência na conversão, pela proteção do sistema, pela sincronização com a rede elétrica e, por conta dos desafios abordados anteriormente, também são responsáveis pelo controle da potência ativa e reativa injetada/absorvida na rede.

Os inversores fotovoltaicos convencionais, em sua grande maioria, não contam com a capacidade de controle de potência ativa e reativa. Os equipamentos que possuem essa capacidade são chamados de inversores inteligentes, sendo estes capazes de fornecer uma gama de serviços à rede, como suporte à tensão durante distúrbios, suporte à frequência, suporte de tensão em regime permanente e controle de rampa de potência (ENAYATI *et al.*, 2020).

O padrão IEEE 1547-2018 é a referência para os REDs que se conectam à rede utilizando inversores inteligentes, estabelecendo os requisitos relacionados ao desempenho de interconexão e interoperabilidade, segurança, manutenção e proteção. Nesse padrão, os REDs são divididos em duas categorias de desempenho (IEEE Standards Association, 2018):

- **Categoria A:** Abrange as capacidades mínimas de desempenho necessárias para a regulação de tensão no sistema elétrico local. Esse nível de desempenho é considerado adequado para aplicações em que a penetração de REDs no sistema de distribuição é menor e onde a potência fornecida pelo RED não está sujeita a variações frequentes e de grande magnitude.
- **Categoria B:** Inclui todos os requisitos da Categoria A e especifica capacidades suplementares necessárias para integrar adequadamente o RED em sistemas onde a penetração de REDs é maior ou onde a potência fornecida está sujeita a variações frequentes e significativas.

Na Tabela 1 são apresentadas as funções de controle exigidas para cada categoria.

Tabela 1 – Requisitos de controle por categoria do RED segundo o IEEE 1547-2018.

Função de Controle	Categoria A	Categoria B
Regulação de Tensão por Controle de Potência Reativa		
Modo Fator de Potência Constante	Obrigatório	Obrigatório
Modo Tensão–Potência Reativa (Volt–Var)	Obrigatório	Obrigatório
Modo Potência Ativa–Potência Reativa (Watt–Var)	Não exigido	Obrigatório
Modo Potência Reativa Constante	Obrigatório	Obrigatório
Controle de Tensão e Potência Ativa		
Modo Tensão–Potência Ativa (Volt–Watt)	Não exigido	Obrigatório

Fonte: Adaptado de IEEE Standards Association (2018).

Segundo Junior (2018), existem duas configurações possíveis de arquitetura para o inversor inteligente, que são: gerenciado e autônomo.

Na configuração gerenciada, o inversor recebe as instruções de um controlador externo. Por exemplo, em uma usina de geração solar, o inversor vai receber as instruções de um operador que tem como interesse controlar as grandezas elétricas no ponto de conexão da usina ao sistema elétrico.

Na configuração autônoma, o próprio inversor é capaz de tomar as decisões, sem a necessidade de um operador externo; o próprio equipamento é capaz de executar funções de alto nível, como, por exemplo, o controle Volt-Var e Volt-Watt.

2.4 Controle Volt-Watt

O controle Volt-Watt (tensão-potência ativa) surge como uma resposta aos problemas decorrentes da alta penetração de GD na rede elétrica, principalmente a sobretensão. O controle é aplicado quando o nível de tensão no ponto de medição excede valores de referência. A partir dessa leitura, o inversor realiza o corte da potência injetada na rede seguindo a curva tensão-potência estabelecida.

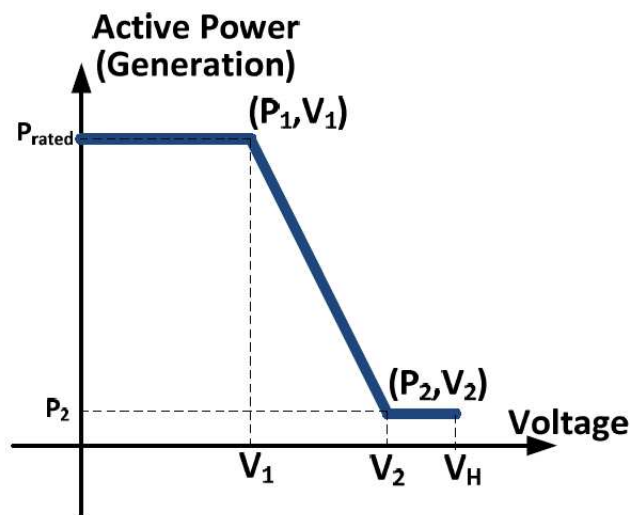
O padrão IEEE 1547-2018, que é um documento de referência para a conexão de REDs na rede elétrica, estabelece valores padrões para os parâmetros da curva do controle Volt-Watt. Os parâmetros da curva para o caso em que o RED apenas gera potência ativa (painéis fotovoltaicos) estão demonstrados na Tabela 2 e a curva característica para esse controle é apresentada na Figura 4, sendo:

- **V1:** O ponto de tensão em que inicia o corte de potência ativa.
- **P1:** A potência injetada pelo RED na rede enquanto a medição de tensão for menor ou igual ao valor do ponto V1; normalmente, esse valor corresponde à potência nominal do

RED.

- **V2:** O ponto de tensão em que o corte de potência é máximo.
- **P2:** Valor de potência injetada pelo RED quando a tensão atinge o valor V2; normalmente, nesse ponto, a potência ativa injetada é igual a zero.
- **VH:** Nível de tensão máximo de operação do RED. Se a tensão no ponto de conexão atingir esse valor e permanecer acima dele pelo tempo de atuação especificado, o equipamento será desconectado da rede.
- **Tempo de Resposta em Malha Aberta:** Tempo que o RED leva para ajustar a potência ativa injetada para 90% do valor desejado, após receber um sinal de atuação do controle Volt-Watt.

Figura 4 – Curva característica do controle Volt-Watt.



Fonte: IEEE Standards Association (2018).

Tabela 2 – Parâmetros definidos para o controle Volt-Watt pelo IEEE 1547-2018.

Parâmetro	Valor Padrão	Mínimo	Máximo
V1	$1,06 \times V_{nominal}$	$1,05 \times V_{nominal}$	$1,09 \times V_{nominal}$
P1	$P_{nominal}$	N/A	N/A
V2	$1,10 \times V_{nominal}$	$V1 + 0,01 \times V_{nominal}$	$1,10 \times V_{nominal}$
P2	Menor valor entre $(0,2 \times P_{nominal})$ e $P_{mínimo}$	$P_{mínimo}$	$P_{nominal}$
Tempo de resposta em Malha Aberta	10 s	0,5 s	60 s

Fonte: Adaptado de IEEE Standards Association (2018).

A principal aplicação do controle Volt-Watt é visando a mitigação da sobretensão na rede elétrica, e realizando esse controle de tensão, uma melhora na estabilidade do sistema.

O controle Volt-Watt é relativamente simples de ser aplicado, sendo assim uma vantagem em relação a outros métodos de controle.

No contexto de redes de distribuição, o controle Volt-Watt é comumente aplicado de forma local, com a medição do nível de tensão sendo realizada no ponto de conexão do inversor à rede, o que proporciona uma autonomia ao controle, não estando sujeito a falhas de comunicação com um controlador centralizado.

Segundo Hou *et al.* (2024), o controle local exige menos recursos computacionais e de comunicação e apresenta maior velocidade de resposta em comparação com os métodos de controle centralizado e distribuído.

Essa atuação do controle local também apresenta desafios como a descoordenação entre diferentes controladores, o que pode causar instabilidade na rede.

O controle Volt-Watt apresenta uma grande eficiência em redes elétricas de distribuição que apresentam um baixo valor da relação X/R (<1) para a impedância de rede (WANZELER *et al.*, 2018).

A principal desvantagem do controle Volt-Watt é o impacto financeiro proporcionado ao proprietário do RED, pois a limitação da potência ativa injetada reduz a remuneração pela energia fornecida à rede. Segundo Giraldez *et al.* (2019), reduzir a potência ativa também pode mitigar sobretensões, mas isso reduz diretamente a produção de energia fotovoltaica e, portanto, geralmente é considerada uma opção apenas quando a tensão está muito alta e o gerenciamento de potência reativa local não resolve o problema.

Em uma rede com alta penetração de REDs utilizando esse método de controle, pode ocorrer uma penalização desigual com os proprietários que estiverem com a geração conectada em pontos mais distantes nos alimentadores, pois nesses pontos ocorrem maiores sobretensões em condição de fluxo reverso e por consequência ocorre um maior corte de potência ativa injetada, causando um impacto financeiro negativo a esses agentes (GERDROODBARI *et al.*, 2021).

2.5 Controle Volt-Var

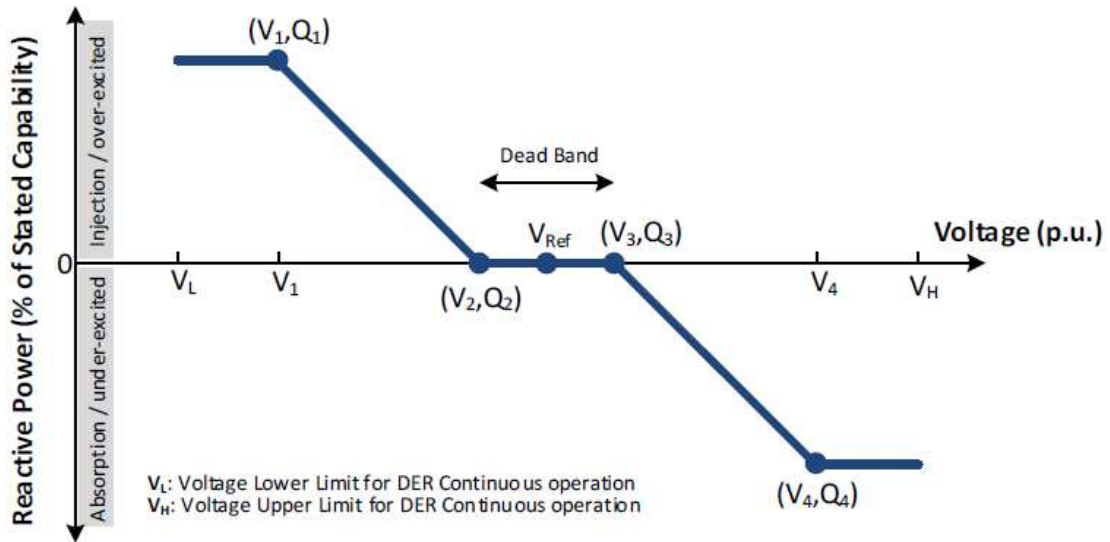
No contexto dos problemas causados pela alta penetração de REDs no sistema elétrico, surge o controle Volt-Var (tensão-potência reativa). Esse controle consiste no gerenciamento da potência reativa injetada ou absorvida pelo RED visando a mitigação de problemas de sobretensão e subtensão na rede. O controle é feito de acordo com a curva tensão-potência

reativa pré-definida, na Figura 5 é apresentada a curva característica do controle Volt-Var, em que:

- **VL**: Nível de tensão mínimo para a operação contínua do RED. Se a tensão no ponto de conexão cair abaixo deste valor, o equipamento sai do modo de operação contínua e entra em um modo de suportabilidade a subtensões, no qual deve permanecer conectado à rede para auxiliar na estabilidade do sistema.
- **V1** – Valor de tensão em que ocorre a máxima injeção de potência reativa; para valores de tensão menores, a potência injetada pelo RED é constante (**Q1**).
- **Q1** – Valor máximo de potência reativa injetada pelo RED.
- **V2** – Valor limite inferior de tensão para a ‘banda morta’; para valores inferiores de tensão, ocorre a injeção de potência reativa, e para valores entre **V2** e **V3**, não ocorre nem injeção nem absorção de potência reativa.
- **V3** – Valor limite superior de tensão para a banda morta; para valores de tensão maiores, ocorre a absorção de potência reativa pelo RED.
- **Q2, Q3** – Valores de potência reativa na banda morta; ambos são iguais a zero.
- **V4** – Valor de tensão em que ocorre a máxima absorção de potência reativa pelo RED; para valores de tensão maiores, a potência absorvida é constante (**Q4**).
- **Q4** – Máximo valor de potência reativa absorvida pelo RED.
- **VH**: Nível de tensão máximo de operação do RED. Se a tensão no ponto de conexão atingir esse valor e permanecer acima dele pelo tempo de atuação especificado, o equipamento será desconectado da rede.
- **Tempo de Resposta em Malha Aberta** – Tempo que o RED leva para ajustar a potência reativa injetada ou absorvida para 90% do valor desejado, após receber um sinal de atuação do controle Volt-Var.

O padrão IEEE 1547-2018 estabelece valores padrões para os parâmetros da curva característica, sendo eles apresentados na Tabela 3.

Figura 5 – Curva característica do controle Volt-Var.



Fonte: IEEE Standards Association (2018).

Tabela 3 – Parâmetros definidos para o controle Volt-Var (categoria B) conforme IEEE 1547-2018.

Parâmetro	Valor Padrão	Mínimo	Máximo
V_{Ref}	$V_{nominal}$	$0,95 \times V_{nominal}$	$1,05 \times V_{nominal}$
$V1$	$V_{Ref} - 0,08 \times V_{nominal}$	$V_{Ref} - 0,18 \times V_{nominal}$	$V2 - 0,02 \times V_{nominal}$
$Q1$	44% da potência aparente nominal (injeção)	0	100% da potência reativa nominal (injeção)
$V2$	$V_{Ref} - 0,02 \times V_{nominal}$	$V_{Ref} - 0,03 \times V_{nominal}$	V_{Ref}
$Q2$	0	100% da potência reativa nominal (absorção)	100% da potência reativa nominal (injeção)
$V3$	$V_{Ref} + 0,02 \times V_{nominal}$	V_{Ref}	$V_{Ref} + 0,03 \times V_{nominal}$
$Q3$	0	100% da potência reativa nominal (absorção)	100% da potência reativa nominal (injeção)
$V4$	$V_{Ref} + 0,08 \times V_{nominal}$	$V3 + 0,02 \times V_{nominal}$	$V_{Ref} + 0,18 \times V_{nominal}$
$Q4$	44% da potência aparente nominal (absorção)	100% da potência reativa nominal (absorção)	0
Tempo de resposta em Malha Aberta	5 s	1 s	90 s

Fonte: Adaptado de IEEE Standards Association (2018).

O padrão IEEE 1547-2018 define que o inversor com função Volt-Var habilitada, deve ter prioridade de potência reativa, assim caso o equipamento já esteja trabalhando com sua potência aparente nominal e seja solicitado pelo controle a inserção ou absorção de potência reativa adicional, o inversor vai reduzir a potência ativa injetada na rede de forma a atingir o valor de potência reativa demandado pelo controle.

O controle Volt-Var apresenta uma alta eficiência em redes elétricas de distribuição com um alto valor para a relação X/R (>3,5) da impedância de rede (KAEWNUKULTORN; HEGEDUS, 2024).

O controle Volt-Var apresenta a vantagem de ser mais completo e versátil que o controle Volt-Watt. Como o RED tem capacidade para injetar e absorver potência reativa, é possível realizar o controle da tensão de forma mais ampla, tanto para subtensão como para sobretensão, além de não ocorrer o problema do corte de potência ativa tão acentuado como no Volt-Watt.

Uma das principais desvantagens desse controle é o possível aumento do fluxo de potência reativa no sistema, pois, ao viabilizar a regulação de tensão, seja por eventos de subtensão ou sobretensão, isso provoca um aumento da parcela reativa da corrente eficaz, ocasionando maiores perdas por efeito Joule (OLIVEIRA *et al.*, 2023).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, são apresentadas as ferramentas computacionais utilizadas, assim como a metodologia adotada no desenvolvimento do trabalho e a estrutura da co-simulação.

3.1 Ferramentas Computacionais

As ferramentas utilizadas para a modelagem do sistema de co-simulação foram: Pandapower, Mosaik, SimBench e OpenDER. Todas as ferramentas citadas foram desenvolvidas em linguagem de programação Python, portanto, antes da descrição de cada ferramenta, a linguagem Python será apresentada.

3.1.1 Python

A linguagem de programação Python tem ganhado muita relevância nos últimos anos, tanto no meio acadêmico como no setor empresarial, o que se atribui às suas muitas vantagens.

A sua simplicidade permite ao novo usuário uma fácil assimilação; a ampla gama de bibliotecas disponíveis para a utilização em diversas áreas de aplicação é um grande atrativo; é uma linguagem gratuita e que possui grande comunidade na internet, que disponibiliza diversos conteúdos, como cursos, tutoriais e documentação técnica.

O Python é frequentemente preferido em relação a outras linguagens de programação, especialmente quando a velocidade de execução do código não é prioridade.

Sendo uma linguagem orientada a objetos, é possível construir hierarquias de classes, como também o uso de conceitos como herança, polimorfismo e encapsulamento. Essas características oferecem uma maior qualidade no software, permitindo a reutilização da lógica implementada, diminuindo a complexidade e a quantidade de linhas do código (LUTZ, 2013; JÚNIOR, 2024).

3.1.2 Pandapower

O Pandapower é uma biblioteca escrita em Python que tem como objetivo oferecer uma ferramenta para cálculos em redes elétricas, visando à otimização de sistemas elétricos de potência. A ferramenta foi construída a partir da integração de duas bibliotecas, pandas e

o pypower, esta última, por sua vez, é uma implementação em Python de outro software bem popular de fluxo de carga, o matpower. O Pandapower oferece diversos recursos para a análise de sistemas elétricos.

A biblioteca tem como foco a análise em regime permanente das três fases do sistema elétrico, sendo apropriada para o estudo de sistemas de transmissão, subtransmissão e sistemas de distribuição trifásicos.

É possível realizar uma modelagem bastante abrangente do sistema elétrico, já que a ferramenta possui uma ampla gama de componentes disponíveis para a montagem da rede. Como foi construída com base na biblioteca pandas, é possível gerar Tabelas com os parâmetros do sistema, assim como produzir resultados em formato tabular, o que facilita a análise da rede elétrica.

O Pandapower oferece como funções de análise do sistema elétrico: fluxo de potência, fluxo de potência ótimo, estimativa de estado, cálculo de curto-circuito e busca topológica em grafos. O método de solução de fluxo de potência utilizado pelo Pandapower é o de Newton-Raphson.

Por ser um framework de código aberto, a biblioteca permite facilidade na automatização e customização por parte do usuário, além de fornecer ferramentas que facilitam a modelagem dos componentes dos sistemas elétricos (PANDAPOWER COMMUNITY, 2024).

3.1.3 Mosaik

O Mosaik é uma plataforma de código aberto escrito em Python, que tem como objetivo principal gerenciar e coordenar co-simulações envolvendo múltiplos simuladores em ambientes complexos — especialmente voltados para REIs.

Para gerenciar e coordenar as co-simulações, o Mosaik disponibiliza uma Interface de Programação de Aplicação (API) que viabiliza a comunicação dos simuladores com o Mosaik. Essa API implementa manipuladores específicos para diferentes tipos de processos, possibilita a criação de cenários de simulação envolvendo múltiplos simuladores, além de agendar a execução passo a passo de cada um deles e gerenciar o fluxo de dados trocado durante a simulação.

Mesmo sendo escrito em Python, a API disponibilizada pelo Mosaik é totalmente independente de linguagem, permitindo a integração do Mosaik com qualquer tipo de simulador (OFFIS, 2025).

O Mosaik tem quatro componentes principais, que são responsáveis por implementar

os diferentes aspectos do framework de co-simulação (PAULA, 2022; OFFIS, 2025):

1. **Simulator API:** Essa é a parte responsável por definir o protocolo de comunicação entre os simuladores e o Mosaik, comunicação essa que ocorre por meio de sockets de rede simples e mensagens codificadas em JSON, o que caracteriza a chamada API de baixo nível. Para certas linguagens de programação, são disponibilizadas também uma API de alto nível.
2. **Scenario API:** A partir desse componente é possível criar os cenários de simulação. Essa API permite a inicialização dos simuladores e a criação de instâncias a partir deles, resultando nas entidades, que podem ser conectadas entre si, estabelecendo a troca de informações entre os simuladores.
3. **Simulator Manager:** Esse é o componente responsável por gerenciar os processos dos simuladores e realizar a comunicação entre eles, sendo capaz de inicializar os novos processos, realizar a conexão de instâncias a módulos que já estão em execução e importar e executar modelos escritos em Python diretamente no mesmo processo – chamada de execução *in-process*, que oferece a vantagem de menor uso de memória.
4. **Scheduler:** Componente responsável por coordenar a execução do cenário, sendo capaz de suportar tanto simulações discretas no tempo como simulações discretas por eventos, permitindo a utilização no cenário de simuladores com passos de tempo diferentes. O Scheduler permite que os simuladores processem informações em paralelo, desde que não exista dependência de dados de outros simuladores.

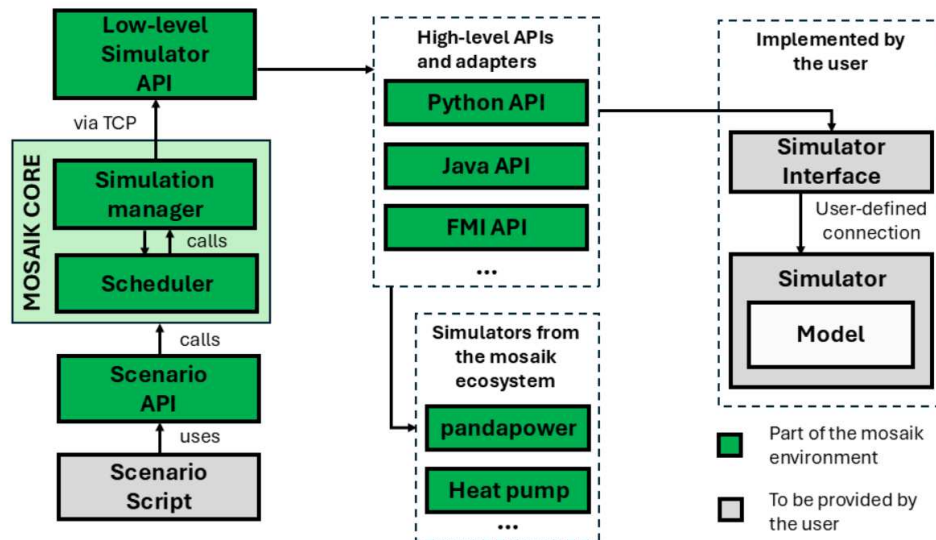
A estrutura do Mosaik é apresentada na Figura 6. No centro da arquitetura temos o núcleo do Mosaik (mosaik-core) que fornece as funcionalidades de gerenciamento (Simulation Manager) e coordenação (Scheduler) da co-simulação. Para o usuário interagir com esse núcleo do Mosaik, são disponibilizadas duas APIs:

- **API de Cenário (Scenario API):** Por meio dessa API o usuário configura o cenário da co-simulação, definindo os simuladores utilizados, seus parâmetros e como eles são conectados entre si.
- **API de simulador de baixo nível (Low-Level Simulator API):** Utilizado para a comunicação do núcleo do Mosaik com o simulador. Também são fornecidas APIs de alto nível para as linguagens de programação Python, Java, Matlab, C# e Rust, atendendo às necessidades da maioria dos usuários. Caso o usuário deseje utilizar a API para outra linguagem de programação ou necessite de requisitos especiais para a sua API, ele deve

utilizar diretamente a API de simulador de baixo nível.

O Mosaik possui o simulador Pandapower já integrado ao seu ecossistema, o que facilita e torna atrativa a utilização dessa ferramenta na co-simulação.

Figura 6 – Estrutura do Mosaik.



Fonte: OFFIS (2025).

3.1.4 SimBench

O SimBench é, primariamente, uma base de dados (dataset) de referência para sistemas de energia elétrica. Ela inclui modelos de rede de diferentes níveis de tensão (BT, MT, AT) e tipos (urbano, rural), séries temporais com perfis de carga e geração (e.g., solar, eólica) com resolução temporal (ex: 15 minutos) para um ano inteiro, e casos de estudo com cenários pré-definidos para diversas análises.

Esses modelos de rede elétrica estão todos disponíveis de forma gratuita no site da plataforma ¹, sendo disponibilizados em arquivos compatíveis com os simuladores INTEGRAL, PowerFactory e PSS@SINCAL. Também são disponibilizados os dados da rede em formato “csv”, sendo possível a sua conversão para a utilização em outros simuladores. O SimBench possui a integração completa com o pandapower, o que facilita e torna atrativa a sua utilização nessa ferramenta de simulação.

¹ Disponível em: <<https://simbench.de/en/download/datasets/>>.

3.1.5 *OpenDER*

O OpenDER (MA *et al.*, 2023) é um projeto de autoria da Electric Power Research Institute (EPRI), que tem como objetivo estabelecer um "benchmark" para a modelagem de REDs, tomando como base o padrão IEEE 1547-2018 e testes realizados em laboratório e em campo.

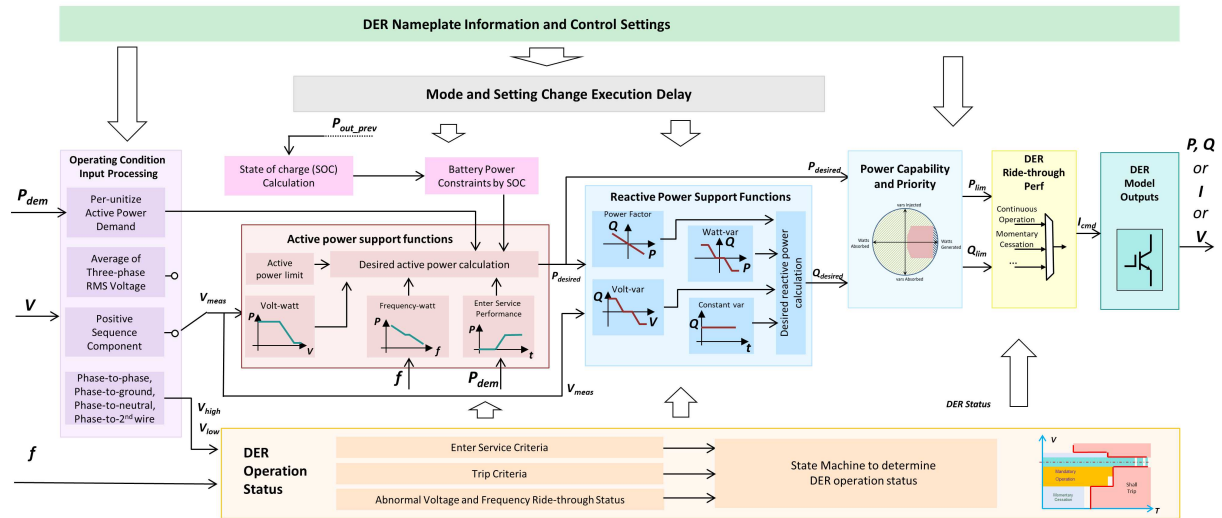
O projeto também tem como objetivo representar de forma precisa os comportamentos em regime permanente e dinâmico de REDs (inversores e BESS). Essa iniciativa propõe a participação de membros da academia e da indústria para uma parceria mútua, visando o desenvolvimento do modelo e também a criação de um grupo chamado "DER Model User's Group" cujo o propósito é utilizar, validar e criar um consenso sobre o OpenDER (Electric Power Research Institute, 2025).

O OpenDER é desenvolvido em dois formatos, sendo eles:

- **DER Model Specifications:** é um documento que detalha a modelagem de REDs utilizando funções e diagramas de blocos, podendo ser utilizado como referência para desenvolvedores que querem montar seu próprio modelo de RED. Esse documento também pode ser usado para compreender as especificações requeridas pela IEEE 1547-2018. Trata-se de um material de consulta para a compreensão e utilização do 'DER Model Software'.
- **DER Model Software:** é o modelo de código aberto, desenvolvido em Python, que representa os REDs (inversores e BESS) em conformidade com os requisitos da IEEE 1547-2018. O software permite especificar detalhadamente o modelo a ser simulado, o usuário fornece as especificações do equipamento, as condições de operação e o modo de controle a ser utilizado e recebe como resposta do modelo variáveis de interesse, como potência ativa e reativa injetada pelo RED. Esse modelo de software é aplicável a diversos tipos de análise, como fluxo de potência estático e fluxo de potência dinâmico, podendo ser utilizado em diversos estudos como avaliação de capacidade de hospedagem, contribuição de corrente de falta, análises de flutuações de tensão, verificação de interação com equipamentos de regulação de tensão, sobretensão temporária e entre outras avaliações.

Na Figura 7 é apresentado o diagrama geral de blocos do OpenDER. Nesse diagrama destacam-se os seguintes blocos:

Figura 7 – Diagrama geral de blocos do OpenDER.



Fonte: Ma *et al.* (2023)

- **DER Nameplate Information and Control Settings:** Recebe os parâmetros de entrada das especificações nominais do RED e o seu modo de controle. A partir deste bloco, o modelo define como o equipamento deve se comportar durante a simulação.
- **Operating Condition Input Processing:** Recebe as medições (tensão ou frequência) no ponto de interesse. Esses dados são processados de forma que possam ser utilizados de forma adequada nas funções de suporte à rede.
- **DER Operation Status:** Define o estado de operação do RED. Entre esses estados temos: "Trip"(Desligado), "Entering Service"(Entrando em serviço), "Continuous Operation"(Operação Contínua) e diferentes estados de "Ride-Through"(Para distúrbios de tensão ou frequência), que representam as respostas do RED para eventos anormais na rede elétrica.
- **Active Power Support Functions:** Retorna a potência ativa desejada do RED, com base nas diferentes funções de controle (Volt-Watt e Frequency-Watt), também considerando o limite de potência ativa nominal do equipamento e, para o momento em que o RED se conecta na rede, segue o critério de entrada em serviço, que controla a rampa de subida da potência ativa. O sub-bloco "Desired active power calculation" é responsável por aplicar a prioridade entre funções de controle, resolvendo assim possíveis conflitos que possam ocorrer e determinando o valor final da potência ativa desejada.
- **Reactive Power Support Functions:** Nesse bloco, é calculada a potência reativa desejada com base em uma das seguintes funções de controle: Constant Power Factor, Volt-Var, Watt-Var e Constant-Var.

- **State of Charge (SOC) Calculation e Battery Power Constraints by SOC:** São blocos específicos para BESS, sendo o primeiro onde é calculado o estado de carga da bateria (SOC) e o segundo responsável por limitar a potência que pode ser injetada ou absorvida com base no SOC.
- **Power Capability and Priority:** Responsável por garantir que a combinação entre potência ativa desejada e potência reativa desejada não supere o limite de potência aparente do RED. Esse bloco implementa a prioridade de potência reativa quando necessário, ou seja, reduz a potência ativa para atender a uma solicitação de potência reativa.
- **DER Ride-through Perf:** Atua de acordo com o bloco "DER Operation Status", modificando a corrente de saída do RED. Por exemplo, caso o status seja "Momentary Cessation", a corrente de saída do equipamento é zerada enquanto durar essa condição.
- **DER Model Outputs:** Disponibiliza os valores resultantes do modelo. Esses resultados podem ser fornecidos como fonte de potência (P, Q), fonte de tensão atrás de uma impedância (V) ou como fonte de corrente (I).

3.2 Metodologia e Estrutura da Co-Simulação

Para a montagem do ambiente foi utilizado como base o exemplo disponível no repositório oficial do GitHub do Mosaik. O exemplo é composto por seis simuladores e uma rede de distribuição simples com três barras, uma carga e um gerador fotovoltaico, no qual é implementada a estratégia de controle Volt-Watt. Na co-simulação é executado na rede um fluxo de potência temporal, como resultado, são retornados em um arquivo *.csv* os valores de potência ativa gerada pelo painel, potência ativa e níveis de tensão nas barras do sistema, carregamento das linhas e o fator de modulação gerado pelo controle Volt-Watt.

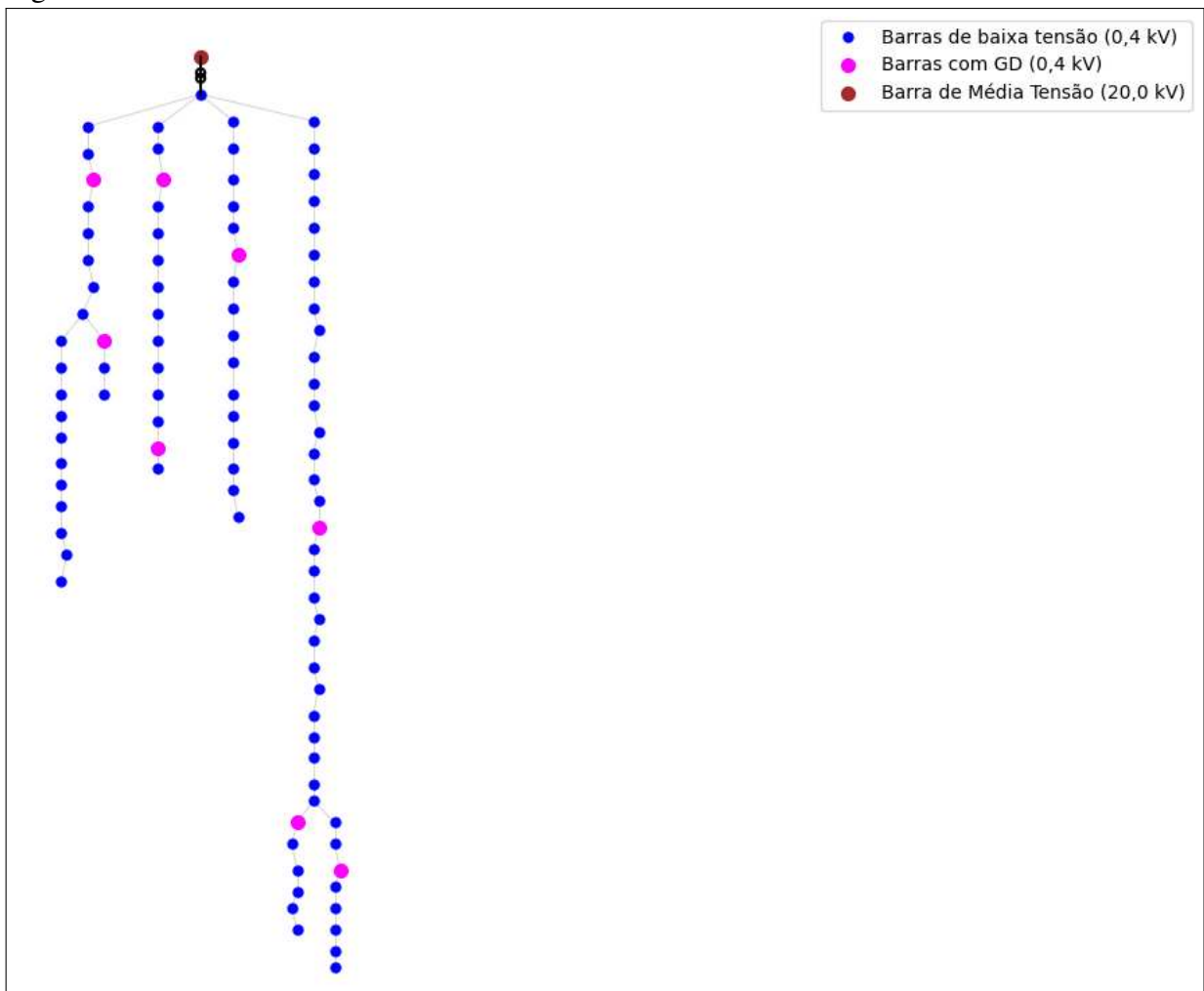
O exemplo do repositório do Mosaik apresenta uma rede elétrica simples; assim, para um resultado mais relevante, a rede elétrica original foi substituída por uma rede maior de distribuição de energia disponibilizada pela ferramenta SimBench. A rede escolhida possui o código de identificação *1-LV-rural2-0-sw*. As características da rede estão apresentadas na Tabela 4 e sua topologia na Figura 8.

Tabela 4 – Dados da Rede Elétrica utilizada.

Rede SimBench 1-LV-rural12-0-sw	
Características Gerais	
Tipo de Rede	Baixa Tensão (LV), Rural
Tensão Nominal	0,4 kV
Número de Nós/Barras	97
Comprimento Total das Linhas	1,47 km
Transformador (MV/LV)	
Tensão do Primário (Média Tensão)	20,0 kV
Potência Nominal do Transformador	250 kVA
Geração (PV)	
Tipo de Geração	100% Solar Fotovoltaica (PV)
Número de Instalações Fotovoltaicas	8
Potência de Pico Instalada Total (P)	145,4 kWp

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 8 – Rede elétrica obtida do SimBench



Fonte: elaborado pelo autor (2025).

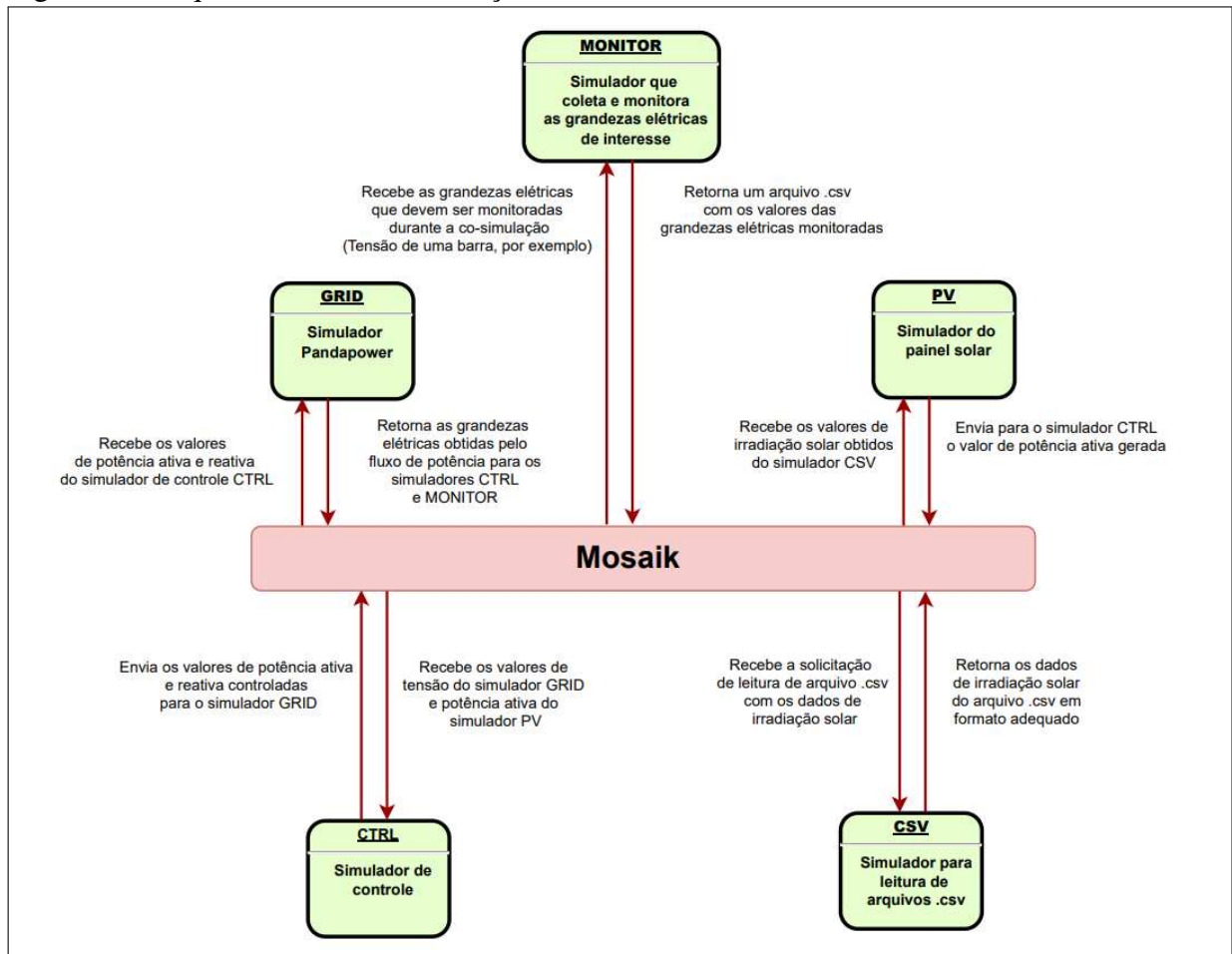
Para o presente trabalho, os simuladores utilizados serão os mesmos do exemplo, com exceção do simulador WebVis — utilizado para fornecer uma interface gráfica à co-simulação —, que apresentou instabilidade na co-simulação e, por essa razão, foi removido do cenário. Os simuladores da co-simulação são descritos a seguir:

- **Grid:** Simulador Pandapower, utilizado para modelar a rede elétrica (obtida do Simbench) e executar o fluxo de potência;
- **CSV:** Simulador utilizado para a leitura de dados de arquivos *.csv*, na co-simulação é utilizado para a leitura do arquivo contendo os valores de irradiância solar;
- **PV:** Simulador do painel solar, recebe os valores de irradiância solar e retorna a potência ativa gerada;
- **Ctrl:** Simulador de controle no qual o OpenDER foi integrado para modelar as funções de controle dos inversores. Recebe os valores de tensão do simulador Grid e os valores de potência ativa do simulador PV. A partir desses dados, calcula os valores controlados de potência ativa e reativa;
- **Collector:** Simulador que coleta os resultados da co-simulação e os retorna em um arquivo *.csv*;

Todos os simuladores mencionados foram implementados em Python, o que facilita sua integração no ambiente de co-simulação.

O Mosaik é responsável pela inicialização dos simuladores, estabelecer a conexão entre suas instâncias, coordenar a troca de dados entre eles e gerenciar o avanço temporal da co-simulação. Na Figura 9 é apresentada como é a interação entre o Mosaik e os simuladores presentes na co-simulação.

Figura 9 – Esquemático da co-simulação.



Fonte: elaborado pelo autor (2025).

Pode-se observar que os dados de entrada de um simulador podem ser as saídas de outro. Para evitar erros durante a co-simulação, a ordem de execução dos simuladores é definida no momento em que são estabelecidas as conexões de dados entre eles, garantindo que os dados de entrada estejam disponíveis para a outra ferramenta.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, serão apresentados o cenário da co-simulação, os resultados obtidos e a respectiva discussão. Para a validação da plataforma serão comparados dois cenários utilizando a mesma rede elétrica, um utilizando o controle Volt-Watt e outro utilizando o controle Volt-Var.

4.1 Definição do Cenário

Para o cenário, é definida uma penetração adicional de geração fotovoltaica correspondente a 50% dos barramentos da rede, essa alocação se deu de forma aleatória. Assim, a rede passa a ser constituída de 56 barras com geração fotovoltaica, sendo 48 barras com inversores inteligentes com capacidade de controle (Volt-Var ou Volt-Watt) e 8 barras com a geração fotovoltaica originalmente presente na rede, sem capacidade de executar funções de controle.

A partir da análise das cargas da rede elétrica escolhida, foram definidas as características do inversor a ser inserido na rede. Os valores nominais de potência ativa, potência reativa e potência aparente do inversor são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Parâmetros Nominais do Inversor Utilizado.

Potência Ativa Máxima (W)	Potência Reativa Máxima (var)	Potência Aparente Máxima (VA)	Fator de Potência (indutivo e capacitivo)
7500	4500	7500	0,8

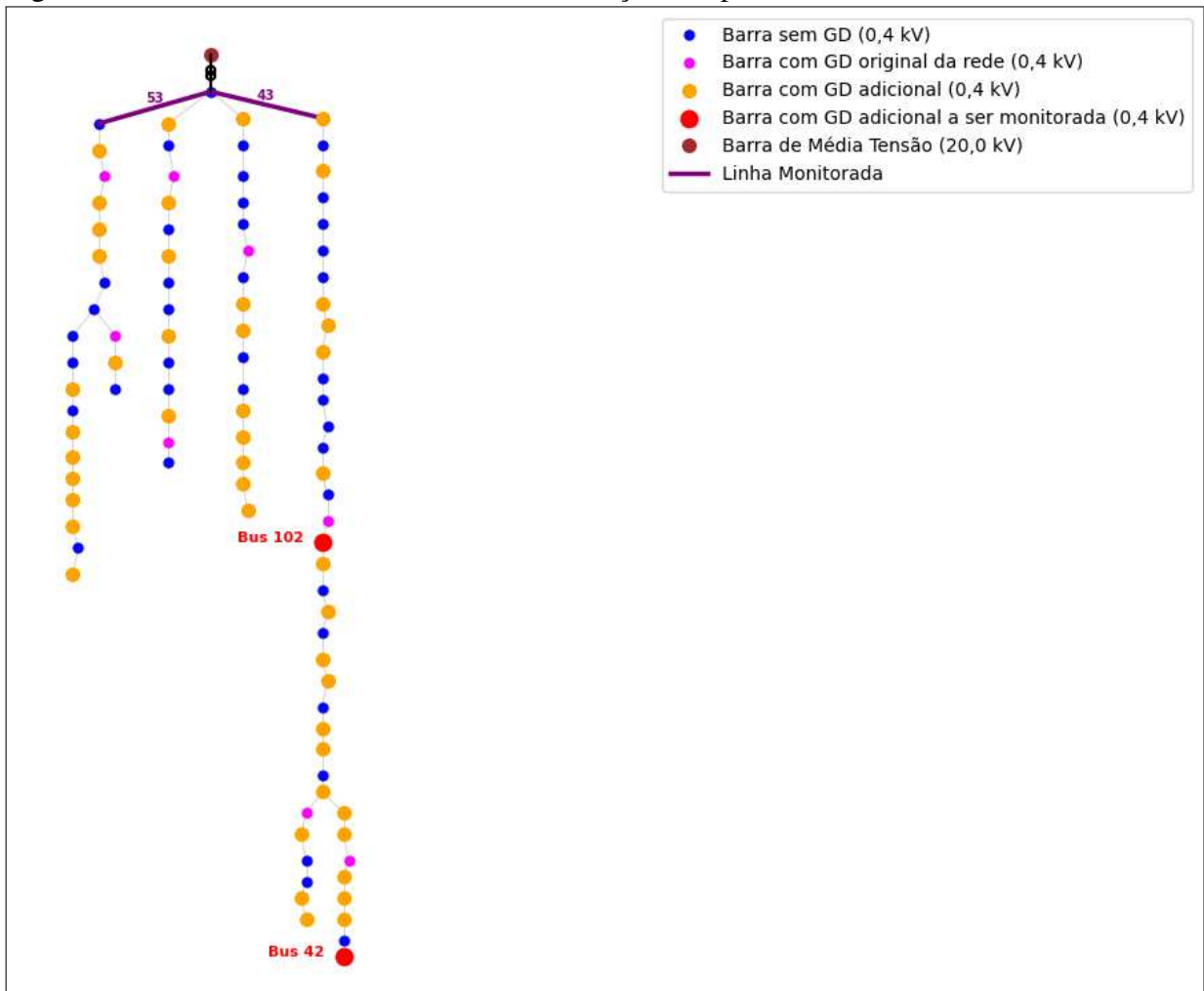
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Os valores foram definidos de forma que o inversor seja capaz de utilizar toda a sua potência aparente para geração de potência ativa e tenha capacidade de injetar/absorver potência reativa quando o controle Volt-Var é habilitado. Também foi observada a determinação do IEEE 1547-2018 que define que o inversor categoria B deve possuir no mínimo 44% da sua potência aparente nominal disponível para o controle Volt-Var (IEEE Standards Association, 2018).

O tempo da co-simulação foi de 9 horas, começando as 07:00h e terminando as 16:00h, o passo de tempo utilizado é de 60 segundos.

Na Figura 10 é apresentada a rede elétrica do cenário e os pontos de interesse que serão monitorados. Nas barras 42 e 102 foram analisadas a tensão e a potência ativa, e nas linhas 43 e 53 foi analisado o seu carregamento percentual. Essas linhas foram escolhidas por serem as linhas iniciais dos alimentadores com o maior número de GDs alocadas.

Figura 10 – Rede elétrica analisada com a indicação dos pontos monitorados



Fonte: elaborado pelo autor (2025).

4.2 Parâmetros do Controle Volt-Watt

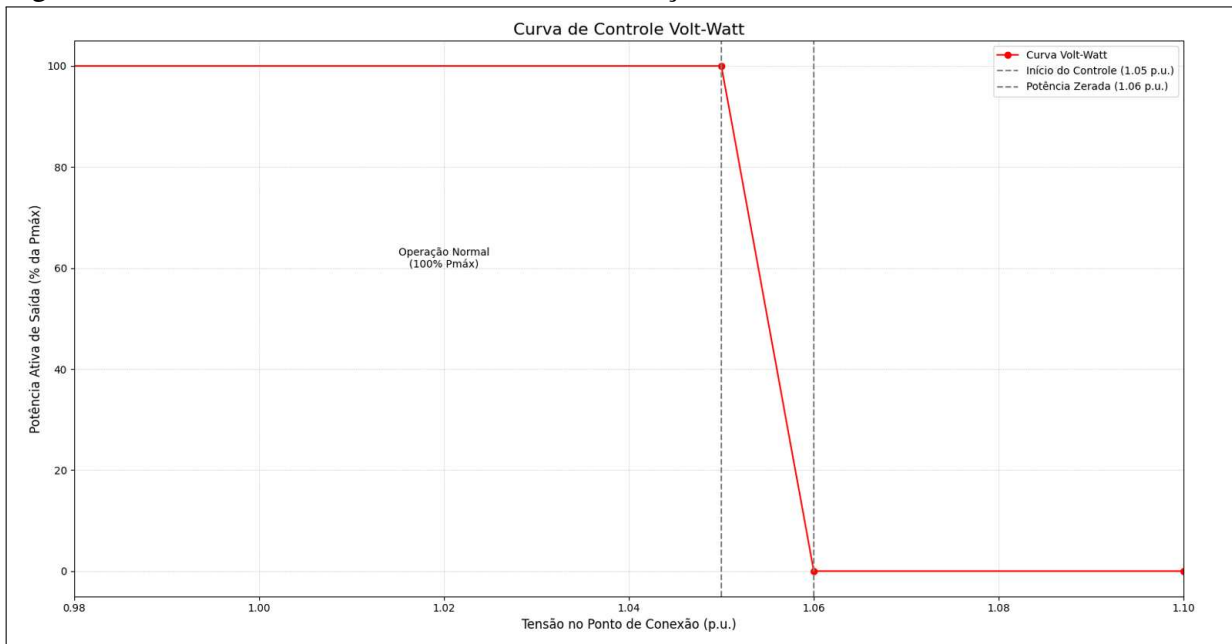
A parametrização do controle Volt-Watt deve seguir os valores apresentados na Tabela 2. Para o cenário analisado, a curva utilizada é apresentada na Figura 11.

Simulações iniciais foram realizadas com o objetivo de definir o valor de corte máximo de potência (V_2), que foi adotado como 1,06 pu. Porém, a escolha desse valor resultou em uma curva muito acentuada, o que provocou problemas de oscilação de tensão durante a atuação do controle. Para mitigar esse problema, foi implementada uma função de suavização na atuação do controle, chamada suavização exponencial ou Média Móvel Exponencialmente Ponderada, definida pela seguinte equação:

$$V_s = \alpha \cdot V_a + (1 - \alpha) \cdot V_{sa} \quad (4.1)$$

- V_s : Valor suavizado atual, que será enviado para a rede.

Figura 11 – Curva Volt-Watt utilizada na co-simulação.



Fonte: elaborado pelo autor (2025).

- V_a : Valor atual (bruto), calculado pelo inversor.
- V_{sa} : Valor suavizado anterior, que representa a memória do sistema.
- α : Fator de Suavização que controla a intensidade do amortecimento, esse valor varia entre 0 e 1, valores próximos de 0 resultam em uma grande suavização e valores próximos de 1 levam a uma pequena suavização.

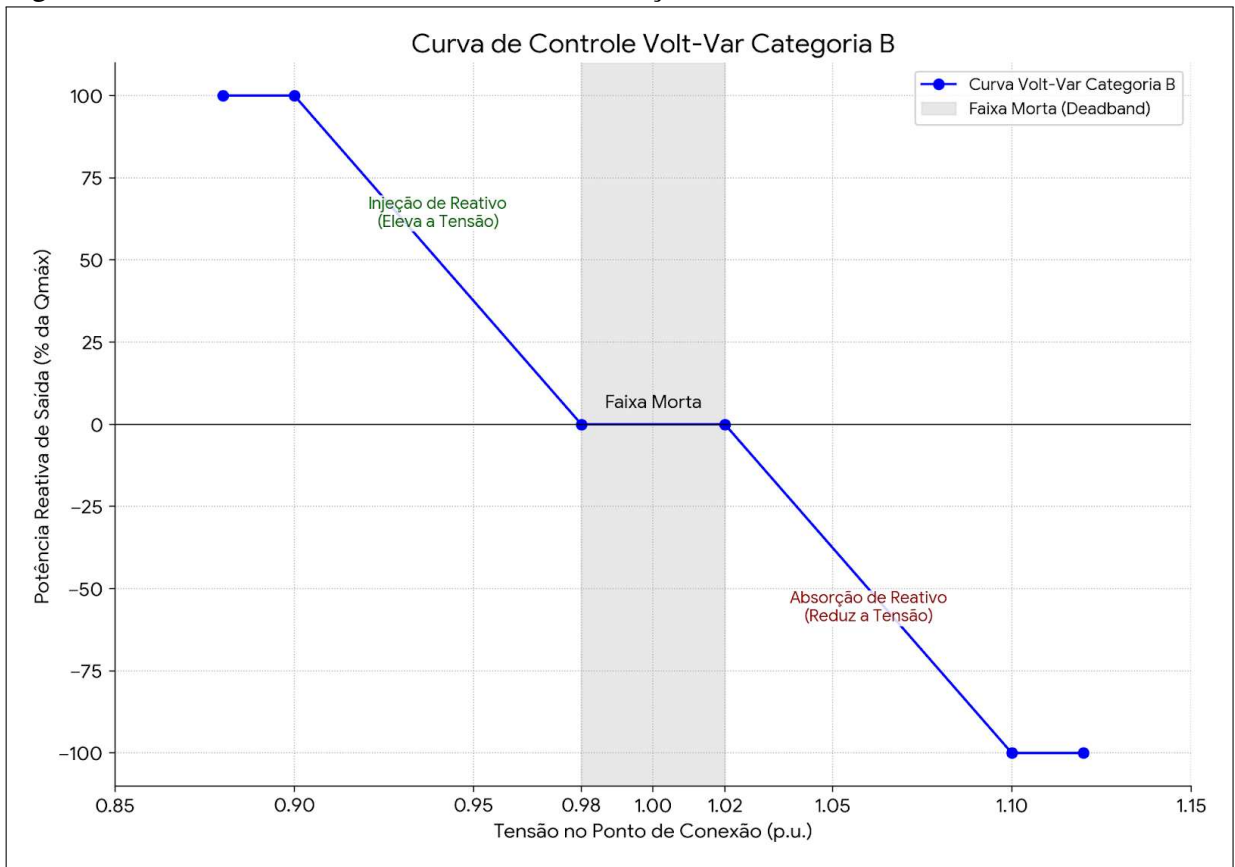
Neste caso, o valor que é suavizado, é a potência ativa injetada pelo inversor na rede. O valor de α adotado para o controle Volt-Watt foi de 0,05.

4.3 Parâmetros do Controle Volt-Var

A parametrização do controle Volt-Var deve seguir os valores apresentados na Tabela 3, a curva para o cenário analisado é apresentada na Figura 12, os parâmetros utilizados são os valores padrões do OpenDER para o controle Volt-Var.

A função de suavização aplicada ao controle Volt-Watt apresentada na equação 4.1, também foi aplicada no controle Volt-Var, neste caso, o valor suavizado é o de potência reativa injetada/absorvida pelo inversor na rede elétrica. O valor de α adotado para o controle Volt-Var foi de 0,2.

Figura 12 – Curva Volt-Var utilizada na co-simulação.



Fonte: elaborado pelo autor (2025).

4.4 Métricas de Avaliação

Para a análise dos controles, será avaliado:

- A capacidade de controle de manter a tensão do barramento de conexão dentro dos limites estabelecidos;
- O corte de energia líquida injetada na rede elétrica, em quilowatt-hora (kWh), realizado pelo inversor durante a aplicação do controle;
- O carregamento percentual da linha em dois pontos de interesse da rede.

O valor de sobretensão máximo para o cenário é definido em 1,05 pu. De forma a observar melhor a capacidade do controle de manter a tensão dentro do nível estabelecido, é utilizada a seguinte função desvio de tensão:

$$J = \sum_{t=1}^T (V_t - V_{\text{ref}})^2 \quad (4.2)$$

- J : função desvio de tensão associada à variação da tensão em relação ao valor de referência;

- V_t : valor de tensão medido no instante de tempo t , são considerados apenas os valores que ultrapassaram o limite de tensão;
- V_{ref} : valor de referência da tensão, fixado em 1,05 pu;
- T : número total de instantes de tempo considerados na análise.

Como a diferença entre a tensão medida e a referência é elevada ao quadrado, a função assume valores maiores em casos de sobretensão mais acentuada.

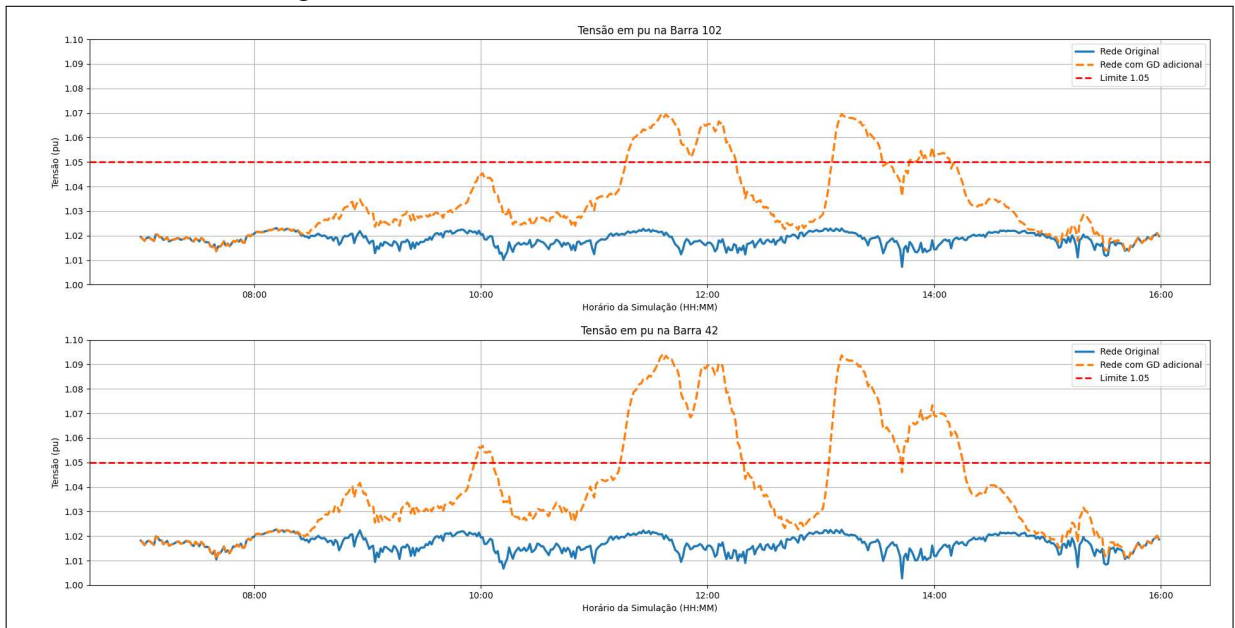
4.5 Análise e Discussão dos Resultados

Inicialmente será apresentado o impacto da inserção adicional de GD nos níveis de tensão dos barramentos monitorados. Serão analisados dois casos, o primeiro caso apresenta os resultados da atuação do controle Volt-Watt aplicado a geração adicional e o segundo caso apresentando os resultados da atuação do controle Volt-Var neste mesmo cenário.

4.5.1 Análise do Impacto da inserção adicional de GD

Na Figura 13 é apresentada a tensão em por unidade (pu) ao longo do tempo para a rede original e a rede com GD adicional, é possível observar um grande aumento nos níveis de tensão.

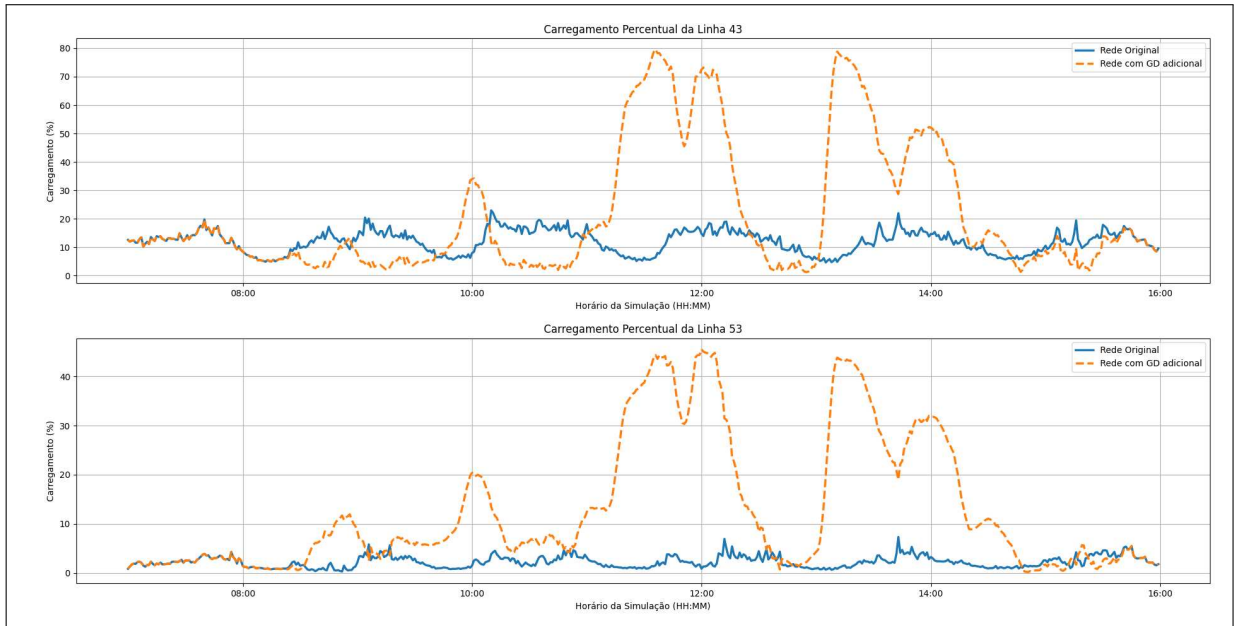
Figura 13 – Comparação da tensão ao longo do tempo para as barras monitoradas entre o caso da rede original e o caso da rede com GD adicional.



Fonte: elaborado pelo autor (2025).

Na Figura 14 é apresentado o carregamento percentual das linhas monitoradas ao longo do tempo para a rede original e a rede com GD adicional, é possível observar um grande aumento nos níveis de carregamento.

Figura 14 – Comparação do carregamento em percentual ao longo do tempo para as linhas monitoradas entre o caso da rede original e o caso da rede com GD adicional.

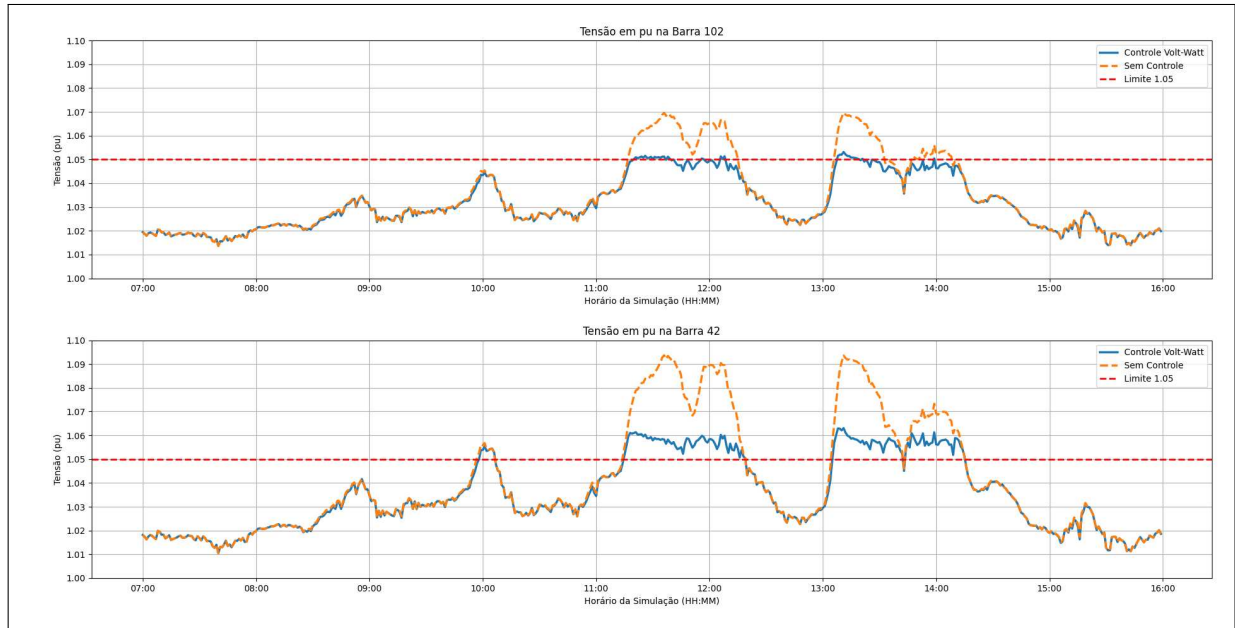


Fonte: elaborado pelo autor (2025).

4.5.2 Análise do controle Volt-Watt

Nesta seção serão apresentados os resultados da atuação do controle Volt-Watt para o cenário de GD adicional. A tensão em pu ao longo do tempo para os barramentos monitorados, comparando a cenário de GD adicional sem controle e a GD com o controle Volt-Watt é apresentada na Figura 15. Na Tabela 6 são apresentados os valores da função desvio de tensão comparado os dois cenários.

Figura 15 – Comparação da tensão ao longo do tempo para as barras monitoradas entre o caso da rede sem controle e a rede com o controle Volt-Watt aplicado.



Fonte: elaborado pelo autor (2025).

Tabela 6 – Análise dos valores da função desvio de tensão para as barras monitoradas (Controle Volt-Watt).

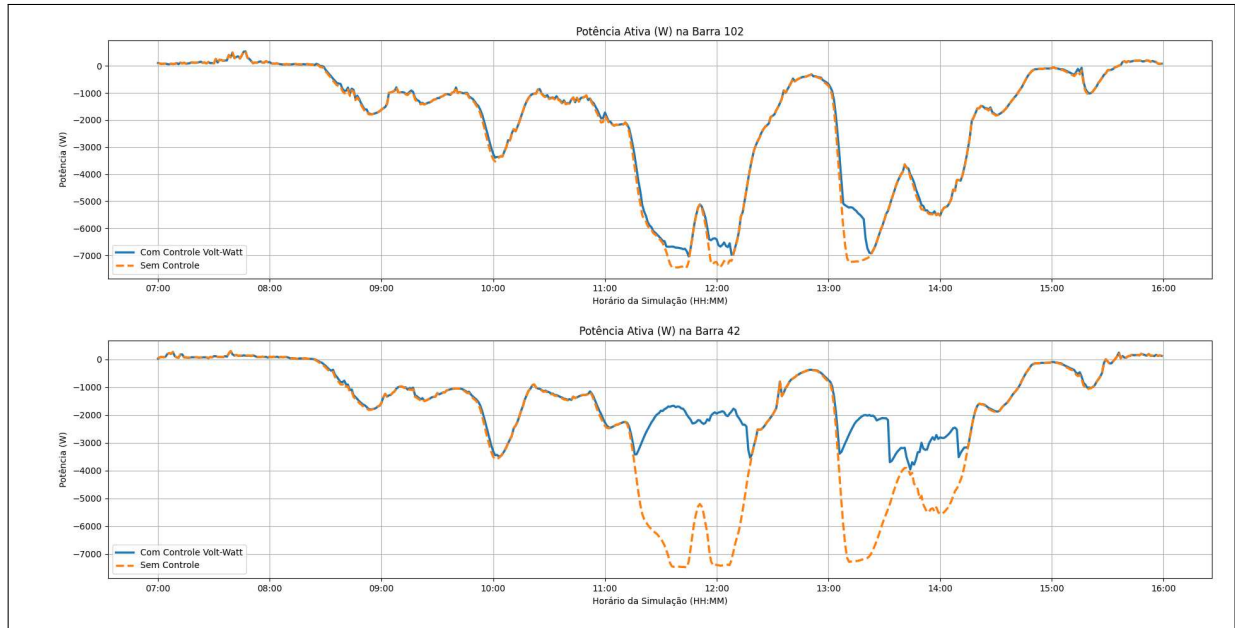
Barra	Sem Controle	Com Controle	Redução Percentual
Barra 102	0,015291	0,000050	99,67%
Barra 42	0,110101	0,008059	92,68%

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Pode-se observar que o controle de tensão foi eficiente, praticamente zerando o valor da função desvio de tensão na barra 102 e reduzindo em mais de 90% na barra 42.

Analisando agora o corte de potência ativa da rede, na Figura 16 é apresentada a potência ativa em watts (W) pelo tempo nos dois cenários analisados. Na Tabela 7 é apresentado o corte de energia líquida injetada em kWh também comparando os dois cenários.

Figura 16 – Comparação da potência ativa (W) ao longo do tempo para as barras monitoradas entre o caso da rede sem controle e a rede com o controle Volt-Watt aplicado.



Fonte: elaborado pelo autor (2025).

Tabela 7 – Comparação da energia líquida injetada durante o período de co-simulação, considerando as condições com e sem controle ativo nas barras monitoradas (Controle Volt-Watt).

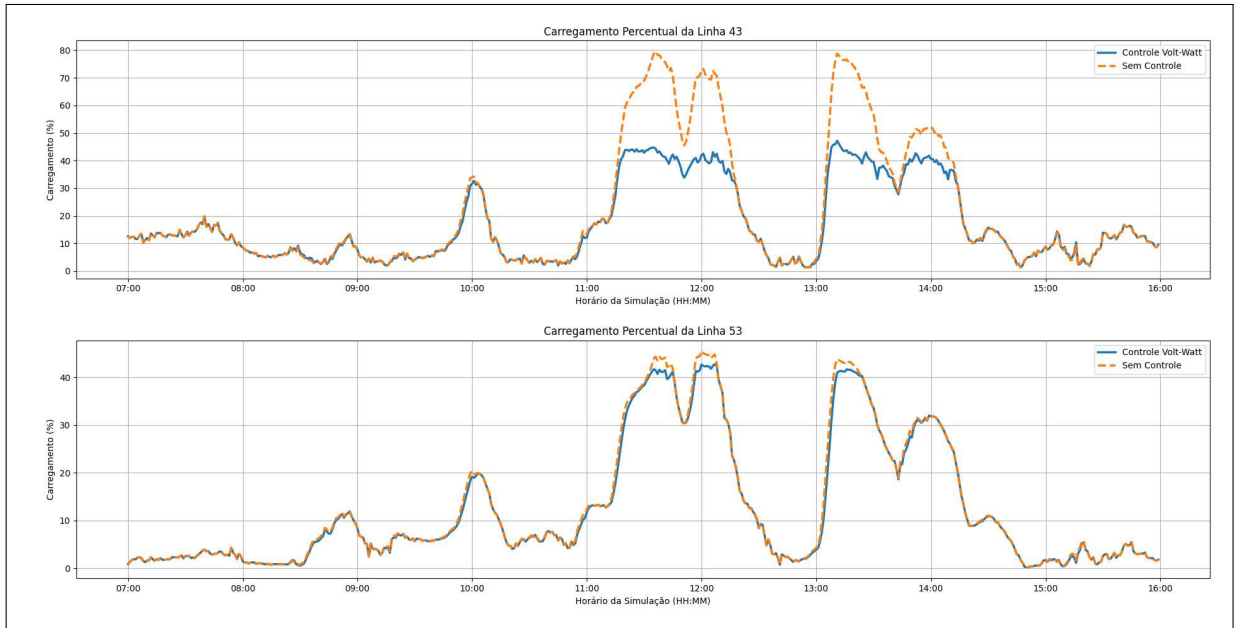
Barra	Sem Controle (kWh)	Com Controle (kWh)	Diferença Absoluta (kWh)	Diferença Percentual
Barra 102	9,4693	8,9953	0,4740	-5,01%
Barra 42	9,7420	5,9290	3,8131	-39,14%

Fonte: elaborado pelo autor (2025).

Observa-se claramente o impacto na geração proporcionado pelo controle Volt-Watt, em ambas as barras houve redução na injeção de potência ativa injetada, com a barra 42 reduzindo a sua injeção de potência em quase 40%.

Para o carregamento das linhas, o resultado ao longo do tempo comparando os dois casos estão apresentados na Figura 17, na Tabela 8 é apresentado o carregamento máximo da linha durante a simulação para os dos dois cenários.

Figura 17 – Comparação do carregamento percentual da linha ao longo do tempo entre o caso da rede sem controle e a rede com o controle Volt-Watt aplicado.



Fonte: elaborado pelo autor (2025).

Tabela 8 – Análise do carregamento máximo das linhas monitoradas, com e sem controle ativo (Controle Volt-Watt).

Linha	Carregamento Máximo Sem Controle (%)	Carregamento Máximo Com Controle (%)
Linha 43	79,59	47,20
Linha 53	45,50	42,77

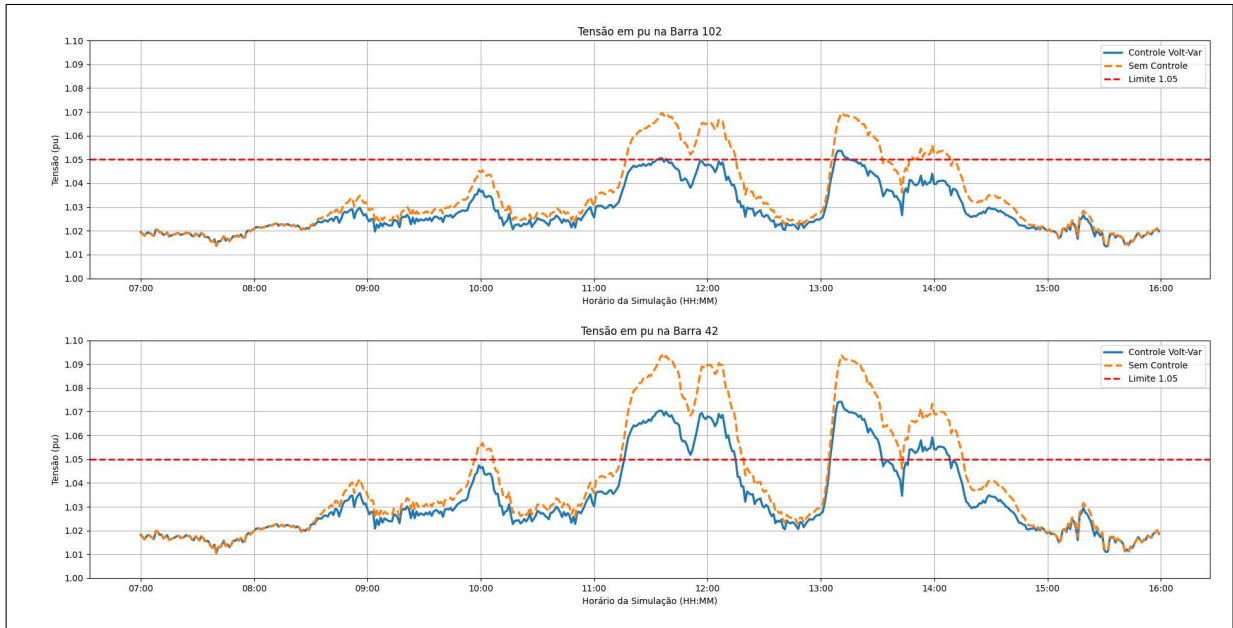
Fonte: elaborado pelo autor (2025).

Podemos observar uma diminuição do carregamento percentual para ambas as linhas, principalmente na linha 43, que é o alimentador com maior número de GDs alocadas.

4.5.3 Análise do controle Volt-Var

Nessa seção, serão apresentados os resultados da atuação do controle Volt-Var para o cenário de GD adicional. A tensão em pu ao longo do tempo para os barramentos monitorados, comparando a cenário de GD adicional sem controle e a GD com o controle Volt-Var é apresentada na Figura 18. Na Tabela 9 são apresentados os valores da função desvio de tensão comparando os dois cenários.

Figura 18 – Comparação da tensão ao longo do tempo para as barras monitoradas entre o caso da rede sem controle e a rede com o controle Volt-Var aplicado.



Fonte: elaborado pelo autor (2025).

Tabela 9 – Análise dos valores da função desvio de tensão para as barras monitoradas (Controle Volt-Var).

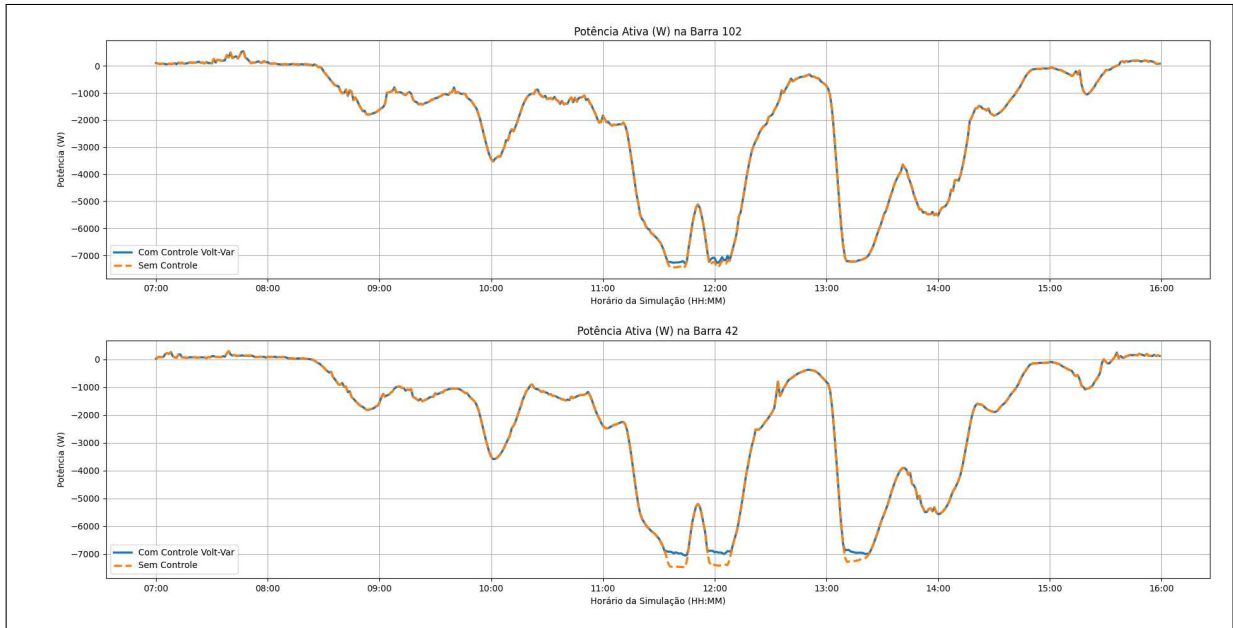
Barra	Sem Controle	Com Controle	Redução Percentual
Barra 102	0,015291	0,000047	99,69%
Barra 42	0,110101	0,020901	81,02%

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Pode-se observar que o controle de tensão foi eficiente, praticamente zerando o valor da função desvio de tensão na barra 102 e reduzindo-o em mais de 80% na barra 42.

Analisando agora o corte de potência ativa da rede, na Figura 19 é apresentada a potência ativa em watts (W) pelo tempo nos dois cenários analisados. Na Tabela 10 é apresentado o corte de energia líquida injetada em kWh também comparando os dois cenários.

Figura 19 – Comparação da potência ativa (W) ao longo do tempo para as barras monitoradas entre o caso da rede sem controle e a rede com o controle Volt-Var aplicado.



Fonte: elaborado pelo autor (2025).

Tabela 10 – Comparação da energia líquida injetada durante o período de co-simulação, considerando as condições com e sem controle ativo nas barras monitoradas (Controle Volt-Var).

Barra	Sem Controle (kWh)	Com Controle (kWh)	Diferença Absoluta (kWh)	Diferença Percentual
Barra 102	9,4693	9,4419	0,0274	-0,29%
Barra 42	9,7420	9,6245	0,1175	-1,21%

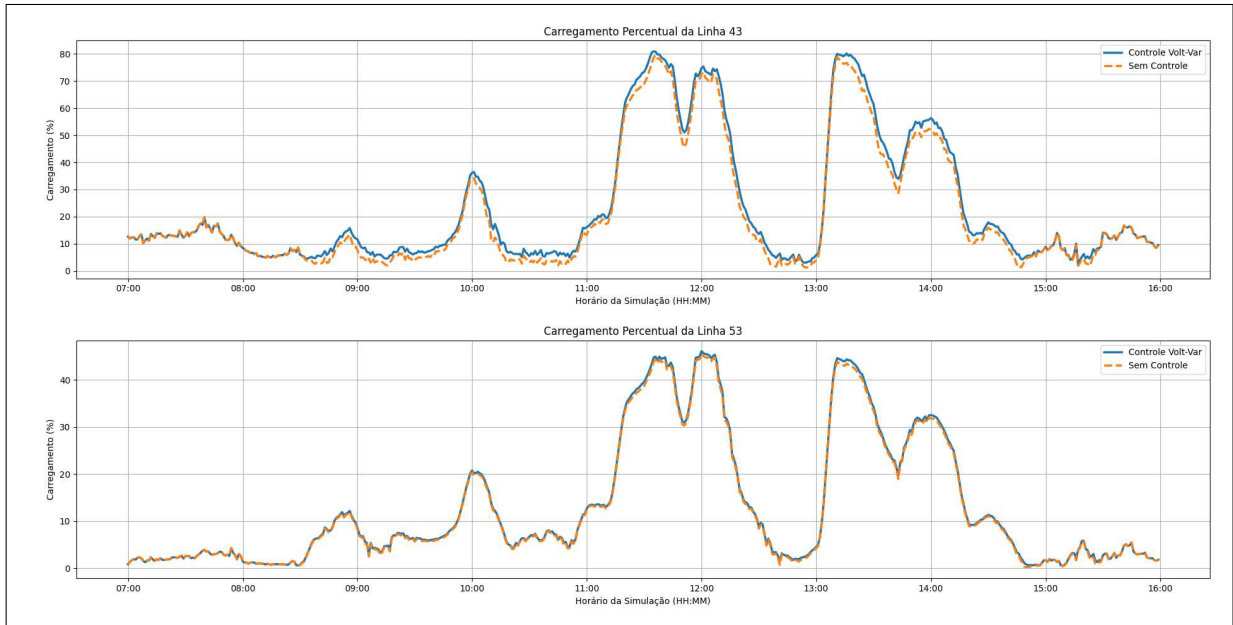
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Podemos visualizar que o impacto na geração proporcionado pelo controle Volt-Var é pequeno, praticamente desprezível, chegando a no máximo uma redução de 1,21% para a barra 42. Essa redução ocorre porque o equipamento estava gerando o valor máximo da sua potência aparente e teve que reduzir a sua injeção de potência ativa para liberar espaço para a absorção de potência reativa, já que no controle Volt-Var, na condição de sobretensão, a prioridade do inversor deve ser a de potência reativa (IEEE Standards Association, 2018).

Para o carregamento das linhas, o resultado do carregamento percentual ao longo do tempo comparando os dois casos estão apresentados na Figura 20, na Tabela 11 é apresentado o carregamento máximo da linha durante a simulação comparando os dos dois cenários.

Podemos observar um aumento do carregamento percentual para ambas as linhas, apesar de ser um aumento pequeno. Esse aumento acaba por indicar um maior número de perdas

Figura 20 – Comparação do carregamento percentual da linha ao longo do tempo entre o caso da rede sem controle e a rede com o controle Volt-Var aplicado.



Fonte: elaborado pelo autor (2025).

Tabela 11 – Análise do carregamento máximo das linhas monitoradas, com e sem controle ativo (Controle Volt-Var).

Linha	Carregamento Máximo Sem Controle (%)	Carregamento Máximo Com Controle (%)
Linha 43	79,59	80,92
Linha 53	45,50	46,13

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

elétricas nas linhas do sistema, isso ocorre por conta da absorção de potência reativa realizada pelo inversor para realizar o controle Volt-Var.

4.5.4 Discussão Comparativa

Nesta seção, será realizada uma comparação entre as métricas dos dois controles, visando destacar os pontos positivos e negativos de cada abordagem.

Nas Tabelas 12, 13 e 14 temos a comparação entre os valores obtidos nas simulações para cada métrica.

Tabela 12 – Redução percentual dos valores da função desvio de tensão para os controles Volt-Watt e Volt-Var.

Barra	Redução com Volt-Watt (%)	Redução com Volt-VAR (%)
Barra 102	99,67	99,69
Barra 42	92,68	81,02

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Tabela 13 – Redução percentual da energia líquida injetada para os controles Volt-Watt e Volt-Var.

Barra	Redução com Volt-Watt (%)	Redução com Volt-VAR (%)
Barra 102	-5,01	-0,29
Barra 42	-39,14	-1,21

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Tabela 14 – Comparação do carregamento máximo das linhas monitoradas, sem controle e com os controles Volt-Watt e Volt-Var.

Linha	Sem Controle (%)	Volt-Watt (%)	Volt-VAR (%)
Linha 43	79,59	47,20	80,92
Linha 53	45,50	42,77	46,13

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Comparando os valores apresentados na Tabela 12, para a barra 102 ambos os controles tiveram resultados muito próximos, praticamente zerando o valor da função para essa Barra. Na barra 42 é possível ver uma diferença mais expressiva na atuação dos controles. O controle Volt-Watt foi mais eficiente em comparação ao controle Volt-Var. Como apresentado na Figura 13, a barra 42 apresentou maiores níveis de tensão que a barra 102, necessitando de uma atuação mais expressiva do controle, o resultado indica que o controle Volt-Watt possui uma capacidade maior de atuação para o controle do nível de tensão já que o controle é realizado pelo corte de potência ativa injetada e não ocorre a limitação de atuação do controle Volt-Var, que consegue atuar até o seu limite de potência reativa.

Analisando a redução percentual de energia injetada na Tabela 13, observa-se uma grande desvantagem do controle Volt-Watt que é a redução da injeção de potência ativa. Para ambas as barras houve uma redução bem maior que no controle Volt-Var, em que a redução da injeção de potência ativa é pequena. Também ficou evidenciada a grande penalidade causada ao inversor da Barra 42, que por conta de sua localização na rede, teve uma grande redução de injeção de energia na rede em comparação à barra 102.

A Tabela 14, apresenta os valores máximos de carregamento para os três cenários da co-simulação, podemos observar que enquanto o controle Volt-Watt proporciona uma diminuição nos níveis de carregamento das linhas do sistema e o controle Volt-Var tem um efeito contrário, proporcionando um aumento no carregamento das linhas e por consequência um aumento nas perdas elétricas das linhas do sistema. A diminuição dos níveis de carregamento proporcionada pelo controle Volt-Watt além de diminuir as perdas elétricas no sistema, também ocasiona um

aumento da capacidade da rede para a integração de novas GDs e novas cargas, sendo assim uma vantagem a ser destacada.

No próximo capítulo, são apresentadas as conclusões do trabalho, fundamentadas nos principais resultados e nas observações realizadas no estudo de caso.

5 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Diante dos conteúdos abordados e resultados apresentados, demonstrou-se a relevância de se utilizar a co-simulação para o estudo de redes elétricas. O ambiente construído mostrou-se eficaz para a análise dos controles Volt-Watt e Volt-Var e a estrutura da co-simulação utilizando o Mosaik integrou de forma satisfatória os diferentes simuladores, o que resultou em uma representação coerente do cenário estudado.

A facilidade em modificar o exemplo disponibilizado no repositório do Mosaik evidenciou duas das vantagens da co-simulação: sua modularidade e flexibilidade; foi possível alterar a rede elétrica original do exemplo, modificar os controles utilizados no inversor, ajustar a quantidade de instâncias de simuladores criadas no cenário e definir as variáveis e pontos de monitoração da rede sem grandes complicações.

No estudo de caso é possível observar o impacto que a GD adicional causou na rede, evidenciando a necessidade de métodos de controle, principalmente quanto ao problema de sobretensão.

Os resultados para ambos os controles indicam uma efetividade na mitigação do problema de sobretensão, sendo que o controle Volt-Watt se destacou por apresentar menor valor da função desvio de tensão. A maior efetividade do controle Volt-Watt pode ser explicada pela maior capacidade de atuação para o controle de tensão uma vez que, para o controle Volt-Var, a capacidade máxima de injeção/absorção de potência reativa do inversor limita a sua atuação. O resultado superior do controle Volt-Watt também indica que a rede elétrica abordada apresenta um baixo valor da relação X/R nas linhas elétricas, já que em redes com essa característica, o controle Volt-Watt apresenta uma alta eficiência.

Ao analisar o corte de energia líquida em ambos os controles se verifica a grande desvantagem do controle Volt-Watt, já que houve um corte massivo da energia injetada para a Barra 42, enquanto que no controle Volt-Var o corte de energia injetada é bem inferior, sendo praticamente desprezível para a Barra 102 e cerca de 32 vezes menor para a Barra 42. Na ausência de uma regulamentação do setor elétrico, responsabilidade da ANEEL e do Ministério de Minas e Energia, que forneça incentivos para prosumidores que colaborem com o controle de tensão, esse corte excessivo pode ser um impeditivo para o uso do controle Volt-Watt.

Quanto aos resultados para o carregamento percentual da linha, o controle Volt-Watt apresentou a vantagem de reduzir os níveis de carregamento do sistema, enquanto o controle Volt-Var apresentou um aumento nesses níveis, indicando também um aumento das perdas

elétricas nas linhas da rede.

Com base na análise comparativa dos controles e de forma a auxiliar na decisão de que controle utilizar, podemos destacar as seguintes variáveis que devem ser consideradas:

- A capacidade de injeção/absorção de potência reativa do inversor;
- A localização do RED na rede;
- A existência de compensação financeira para o consumidor que colaborar com o controle de tensão na rede;
- A característica X/R da rede elétrica.

Diante do que foi apresentado no presente trabalho, é possível afirmar que os objetivos foram atingidos, com o resultado final de uma plataforma de co-simulação capaz de simular redes elétricas de baixa tensão com alta penetração de REDs e analisar diferentes controles aplicados a GD.

Para trabalhos futuros ¹, são destacadas as seguintes possibilidades:

1. Realização de análises das duas estratégias de controle abordadas em uma rede elétrica que apresente alto valor da relação X/R nas linhas;
2. Utilização do OpenDER para associar a cada inversor um Battery Energy Storage System (BESS) no cenário com o controle Volt-Watt, como forma de reduzir o desperdício de energia;
3. Emprego da plataforma de co-simulação para análise de outras estratégias de controle, como o controle Watt-Var;
4. Integração de um simulador de comunicações para permitir a análise dos cenários com a presença de um controlador centralizado, gerando assim um sistema de controle híbrido;
5. Inserção do modelo trifásico da rede elétrica;
6. Inclusão de um simulador financeiro para possibilitar a avaliação econômica da aplicação dos controles.

¹ O código fonte da co-simulação está disponível na plataforma de código aberto GitHub, na página do Grupo de Redes Elétricas Inteligentes (GREI) da Universidade Federal do Ceará (UFC).

REFERÊNCIAS

- ALVES, P.; AZEVEDO, R. M. de; CANHA, L. N.; PAIXÃO, J. L. Minimization of the impacts caused by distributed generation to the electric system by exploring the reactive control range of solar inverters. In: **2018 Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE)**. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–6.
- CARLETTE, L. P.; FALCÃO, D. M. Análise do impacto de inversores inteligentes aplicados a redes de distribuição em baixa tensão. **SBSE - Sociedade Brasileira de Sistemas Elétricos**, v. 1, n. 1, p. 2246, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.48011/sbse.v1i1.2246>>.
- Electric Power Research Institute. **OpenDER Project**. 2025. <<https://www.epri.com/opender>>. Acesso em: 15 jul. 2025.
- Empresa de Pesquisa Energética. **Painel Dinâmico de Geração Distribuída**. 2024. <<https://dashboard.epe.gov.br/apps/pdgd/>>. Acesso em: 20 jun. 2025.
- ENAYATI, B.; BRAVO, R.; ROPP, M.; HIGGINSON, M.; AGUËRO, J. R.; KEY, T.; CLEVELAND, F.; SIIRA, M.; QUINT, R.; VARTANIAN, C.; ZHANG, L.; BOEMER, J. C. **Impact of IEEE 1547 Standard on Smart Inverters and the Applications in Power Systems**. NJ: IEEE, 2020. Working Group Report. Disponível em: <https://resourcecenter.ieee-pes.org/publications/technical-reports/PES_TR_IEEE1547.html>.
- Energes. **Inversão de fluxo: o que é e como pode afetar a rede elétrica?** 2024. <<https://energes.com.br/inversao-de-fluxo/>>. Acesso em: 20 jun. 2025.
- GERDROODBARI, Y. Z.; RAZZAGHI, R.; SHAHNIA, F. Decentralized control strategy to improve fairness in active power curtailment of pv inverters in low-voltage distribution networks. **IEEE Transactions on Sustainable Energy**, IEEE, v. 12, n. 4, p. 2282–2292, Oct. 2021.
- GIRALDEZ, J.; EMMANUEL, M.; HOKE, A.; SURYANARAYANAN, S. **Impacts of Voltage-Based Grid-Support Functions on Energy Production of PV Customers: Preprint**. Golden, CO, 2019. Disponível em: <<https://www.nrel.gov/docs/fy20osti/72701.pdf>>.
- GLEDHILL, S. **Understanding the Value of Distributed Energy Resources**. 2023. Yale Environment Review. Acesso em: 14 jun. 2025. Disponível em: <<https://environment-review.yale.edu/understanding-value-distributed-energy-resources>>.
- GOMES, C.; THULE, C.; BROMAN, D.; LARSEN, P. G.; VANGHELuwe, H. **Co-simulation: State of the Art**. 2017. Disponível em: <<https://arxiv.org/abs/1702.00686>>.
- GOUVÊA, A. R. **Uma visão estratégica do setor de distribuição de energia elétrica frente aos desafios da expansão de recursos energéticos distribuídos no Brasil**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, mar 2019. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11422/13704>>.
- HOU, Q.; DAI, N.; HUANG, Y. Voltage regulation enhanced hierarchical coordinated volt/var and volt/watt control for active distribution networks with soft open points. **IEEE Transactions on Sustainable Energy**, v. 15, n. 3, Jul. 2024.
- HUANG, Y.; WANG, L.; WANG, K. Investigation of var compensation schemes in unbalanced distribution systems. **Complexity**, Hindawi, v. 2019, oct 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1155/2019/7824743>>.

IEEE Standards Association. **IEEE Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces**. 2018. IEEE Std 1547-2018. DOI: 10.1109/IEEESTD.2018.8332112.

JHA, R. R.; DUBEY, A. **Local Smart Inverter Control to Mitigate the Effects of Photovoltaic (PV) Generation Variability**. 2019. Disponível em: <<https://arxiv.org/abs/1912.03586>>.

JUNIOR, L. C. R. **Inversores Inteligentes em Sistemas Fotovoltaicos para Controle Integrado de Funções Utilizando o OpenDSS**. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG, Brasil, ago. 2018.

JÚNIOR, M. E. B. de O. **Análise das Bases de Dados Abertos da ANEEL: Estudo de Relação entre os Custos de Tarifação e a Qualidade Comercial no Serviço de Distribuição de Energia Elétrica de Concessionária do Nordeste Brasileiro**. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica).

KAEWNUKULTORN, T.; HEGEDUS, S. Impact of impedances and solar inverter grid controls in electric distribution line with grid voltage and frequency instability. **Energies**, MDPI, v. 17, n. 21, p. 5503, 2024. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1073/17/21/5503>>.

LUTZ, M. **Learning Python: Powerful Object-Oriented Programming**. 5. ed. Sebastopol, CA: O'Reilly Media, 2013. 1643 p. ISBN 1449355730.

MA, Y.; REN, W.; HUQUE, A.; ANANDAN, J.; RADATZ, P.; WANG, W.; ZANDT, D. V.; SEAL, B.; BOEMER, J. C. Open-source distributed energy resource (opender) model: Harmonizing accurate interpretations of IEEE Std 1547-2018. In: **2023 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)**. Knoxville, TN, USA: IEEE, 2023. ISBN 978-1-6654-6441-3.

MIHAL, P.; SCHVARCBACHER, M.; ROSSI, B.; PITNER, T. Smart grids co-simulations: Survey & research directions. **Sustainable Computing: Informatics and Systems**, v. 35, p. 100726, 2022.

OFENLOCH, A.; SCHWARZ, J. S.; TOLK, D.; BRANDT, T.; EILERS, R.; RAMIREZ, R.; RAUB, T.; LEHNHOFF, S. MOSAIK 3.0: Combining time-stepped and discrete event simulation. In: OFFIS INSTITUTE, OLDENBURG, GERMANY. **Proceedings of the 2020 ACM SIGSIM Conference on Principles of Advanced Discrete Simulation (PADS)**. Oldenburg, Germany, 2020.

OFFIS. **Mosaik – Co-simulation Framework for Smart Grid Simulations**. 2025. Acesso em: 6 jun. 2025. Disponível em: <<https://mosaik.readthedocs.io/en/latest/overview.html#what-s-mosaik-supposed-to-do>>.

OLIVEIRA, E. B. de; PARIZZI, J.; MARTINS, R. M.; LAZARO, C.; MARCHESAN, G. Análise de utilização de controle volt-var em sistemas com grande penetração de geração fotovoltaica. In: **15th Seminar on Power Electronics and Control (SEPOC 2023)**. Santa Maria, Brasil: [s.n.], 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.53316/sepoc2023.035>>.

PANDAPOWER COMMUNITY. **pandapower - an Open-Source Python Tool for Convenient Modeling, Analysis and Optimization of Electric Power Systems**. 2024. Acesso: 17 jun. 2025. Disponível em: <<https://www.pandapower.org/about/#modeling>>.

PAULA, Y. S. de. **Estudo e Desenvolvimento de um Ambiente de Simulação para Aplicações de Redes Elétricas Inteligentes Utilizando o Software para Co-Simulação Mosaik 3.0.** Dissertação (Trabalho de Conclusão de Curso) — Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil, 2022. Curso de Graduação em Engenharia Elétrica, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Elétrica.

WANZELER, T. M.; VIEIRA, J. P. A.; RADATZ, P.; SOUZA, V. C.; PINHEIRO, D. C. Assessing the performance of smart inverter volt-watt and volt-var functions in distribution systems with high pv penetration. In: **2018 Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE)**. Niterói, Brazil: IEEE, 2018. p. 1–6.