



Serviço Público Federal
Ministério da Educação

Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E
URBANISMO E GEOGRAFIA
CURSO DE ENGENHARIA
ELÉTRICA**

**ANÁLISE DE TÉCNICAS DE CONTROLE COOPERATIVO
ENTRE INVERTORES EM AMBIENTES DE MICRORREDE**

ARTHUR MARTINS DE ABREU

Campo Grande – MS

2025

ANÁLISE DE TÉCNICAS DE CONTROLE COOPERATIVO ENTRE INVERSORES EM AMBIENTES DE MICRORREDE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, *Campus* Campo Grande, como um dos requisitos para a conclusão do curso de Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Moacyr Aureliano Gomes de Brito

Campo Grande-MS

2025

**ANÁLISE DE TÉCNICAS DE CONTROLE COOPERATIVO ENTRE INVERSORES
EM AMBIENTES DE MICRORREDE**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Mato Grosso do Sul na Faculdade de Engenharias,
Arquitetura e Urbanismo e Geografia, para obtenção da Graduação em Engenharia Elétrica.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Moacyr Aureliano Gomes de Brito

Prof. Dr. Luigi Galotto Jr.

Eng. Willians Ferreira

Campo Grande-MS

2025

DECLARAÇÃO DE AUTORIA E RESPONSABILIDADE

Arthur Martins de Abreu, residente e domiciliado na cidade de Campo Grande, Estado do Mato Grosso do Sul, portador do RG de nº 24xxx71 e CPF nº 082.xxx.701-xx, declaro que o “Trabalho de Conclusão de Curso” apresentado, com o título “Análise de técnicas de controle cooperativo entre inversores em ambientes de microrrede” é de minha autoria e assumo a total responsabilidade pelo seu conteúdo e pela originalidade do texto. Declaro que identifiquei e referenciai todas as fontes e informações gerais que foram utilizadas para construção do presente texto. Declaro também que este artigo não foi publicado, em parte, na íntegra ou conteúdo similar em outros meios de comunicação, tendo sido enviado com exclusividade para a Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS).

Campo Grande, 3 de Dezembro de 2025.

Arthur Martins de Abreu

“Dois mais dois são cinco é, às vezes, uma coisa muito encantadora.” (DOSTOIÉVSKI, F. Memórias do Subsolo.)

“Olha que não há mais metafísica no mundo senão chocolates.” (PESSOA, F. Tabacaria.)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, não como conceito, mas como presença viva, origem, fonte do nous e destino de todo movimento. Não houve noite de estudo, dúvida existencial ou falha de simulação em que Ele não estivesse ali, sustentando-me no fundo do ser, onde a mente toca o eterno, pois nem uma folha toca o chão sem que Deus permitisse.

Agradeço à minha família, à minha mãe Ana e meu pai Eder, não apenas pelo apoio, mas por serem o meu primeiro cosmos. Foram vocês que me ensinaram o valor da responsabilidade, da disciplina, da fé e da perseverança. Cada passo meu é continuação de uma história que começou antes de mim.

Agradeço a minha namorada Yanni, que esteve comigo por todos esses anos, com quem sempre tive uma palavra de consolo e aprendizado. Seu amor foi constante quando tudo ao redor era não linear e caótico. Obrigado pelas conversas longas, pelas mensagens curtas, pelos cafés, pela terapia, sobretudo, por acreditar em mim em todos os momentos.

Ao meu professor e orientador Moacyr, agradeço por me ajudar a transformar minha curiosidade em rocha sólida para o conhecimento, que teve paciência em explicar e explicar até que eu entendesse.

Ainda, agradeço ao Prof. Luigi e ao Eng. Willians por aceitarem compor a banca de avaliação deste trabalho, contribuindo com seus conhecimentos.

Aos amigos que caminharam comigo, nos estudos, nas conversas, nas dúvidas e nos pequenos gestos, deixo meu agradecimento silencioso e sincero. E às pessoas que de forma indireta me ajudaram nessa caminhada. Enfim, agradeço profundamente aos amigos que fiz no período de 2021 a 2025. Cada encontro, e momentos de descontração no “fundão” foram enriquecedores e contribuíram para minha jornada acadêmica e evolução pessoal.

RESUMO

As microrredes surgiram em um contexto de transição energética e geração distribuída, estas são compostas por fontes geradoras, cargas, armazenamento e são conectadas ou não à rede principal da concessionária, mas junto com seus benefícios apresentam desafios e o controle é um destes. Garantir sincronismo entre as fontes geradoras e equilíbrio de potência é possível com o uso de técnicas adequadas de paralelismo. Este trabalho busca fazer uma revisão teórica sobre o funcionamento das microrredes e desenvolver um modelo computacional no MATLAB/Simulink que demonstra a cooperação entre dois inversores trifásicos em paralelo usando a metodologia de controle por curvas de decaimento, via Droop. Os inversores modelados formam uma rede de $127V_{rms}$ fase-neutro e com potência base de 645W cada. A proposta visa garantir estabilidade, sincronização e equilíbrio de potência em uma microrrede baseada em fontes renováveis. Conclui-se que os resultados confirmaram o adequado funcionamento do paralelismo de inversores controlados pelo controle Droop, a capacidade de suportar perturbações e distribuir potência e operar como uma microrrede em modo ilhado. O uso de inversores cooperando entre si devido ao controle droop possibilita a formação de redes mais resilientes, prontas para atender às novas demandas do sistema elétrico.

PALAVRAS CHAVE: Controle, Geração Distribuída, Inversores, Microrredes.

ABSTRACT

Microgrids emerged in a context of energy transition and distributed generation. They are composed of generation sources, loads, storage systems, and may be connected or not to the main utility grid. However, along with their benefits, microgrids also present challenges, and control is one of them. Ensuring synchronism among generating units and power sharing is possible through the use of appropriate parallel-operation techniques. This work aims to provide a theoretical review of microgrid operation and to develop a computational model in MATLAB/Simulink that demonstrates the cooperation between two three-phase inverters operating in parallel using the droop control methodology. The modeled inverters form a 127 Vrms phase-to-neutral network, each with a rated power of 645 W. The proposal seeks to ensure stability, synchronization, and power balance in a renewable-based microgrid. The results confirmed the proper operation of inverter parallelism controlled by droop control, the ability to withstand disturbances, share power, and operate as an islanded microgrid. The use of inverters cooperating through droop control enables the formation of more resilient networks, ready to meet new demands of the electrical system.

KEYWORDS: Control, Distributed Generation, Inverters, Microgrids.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
1.1 Objetivos Gerais	10
1.2 Objetivos Específicos	10
1.3 Organização do Trabalho	11
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1 Controle Mestre–Escravo	14
2.2 Controle Centralizado	15
2.3 Controle Descentralizado	16
2.4 Controle por Curvas de Decaimento (Droop)	17
3 MODELAGEM DOS ELEMENTOS	20
3.1 Filtro de Saída dos Inversores	20
3.2 Controle Droop	23
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	25
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	33
REFERÊNCIAS	35

1 INTRODUÇÃO

O sistema elétrico está em um período de transição energética, ou seja, fontes não renováveis estão sendo substituídas por fontes renováveis que são mais sustentáveis e menos poluentes. Esse cenário impulsiona o uso de geração distribuída (GD) e o desenvolvimento das microrredes, que integram a geração, armazenamento e controle da energia elétrica.

Atualmente, o conceito de GD faz parte de um conceito mais amplo denominado Recursos Energéticos Distribuídos (RED), que envolve não somente a produção, mas também o armazenamento, a redução ou transformação da energia. Assim como a GD, os RED, em razão de sua modularidade, permitiriam a expansão coordenada e flexível do sistema de distribuição, com custo reduzido e aumento da confiabilidade. A introdução dos RED no setor elétrico pode alterar a estrutura tradicional da rede de distribuição e incrementar a complexidade do seu gerenciamento, operação e manutenção [4].

O envelhecimento da infraestrutura energética do país, tem colocado em discussão questões relacionadas à segurança energética, uma vez que sistemas elétricos estão cada vez mais vulneráveis à nova dinâmica de fluxo de potência. Esta situação pode originar problemas de congestionamento na rede, aumento dos custos e cortes no fornecimento de energia, principalmente, quando do aumento da geração renovável [5].

Nesse sentido, destaca-se a tecnologia de microrredes que deve revolucionar a política energética, tecnológica, estrutural e que incorporará o consumidor como uma voz ativa no processo de geração, distribuição, consumo e comercialização de energia elétrica.

A inclusão de GD nas redes de distribuição pode trazer diversos benefícios, tais como [1–3]:

- Reserva girante;
- *Capacidade de peak shaving*;
- Aumento da confiabilidade e qualidade de energia;
- Alternativa para expansão ou uso da rede elétrica;
- Unidades de menor porte (facilidade de instalação próxima às cargas) e de menor custo;
- Utilização de fontes renováveis e não convencionais.

Por outro lado, a utilização de GD resulta em uma série de dificuldades técnicas e econômicas, algumas das quais são listadas a seguir [1–3]:

- Forte acoplamento tensão - potência ativa em redes de distribuição (limitação dos níveis de injeção de potência na rede);
- Aumento das correntes de curto-círcuito nas redes de distribuição;
- Dificuldade na determinação da corrente de curto-círcuito na presença de conversores estáticos;
- Fluxos de potência bidirecionais, tornando mais complexos os sistemas de proteção;
- Obrigatoriedade da desconexão das unidades de GD em caso de faltas na rede;
- Variações de tensão e harmônicos na rede;
- Necessidade de estudos do comportamento dinâmico das redes de distribuição;
- Grande capacidade instalada de GD pode afetar a estabilidade do sistema de transmissão.

A maior autonomia e confiabilidade das microrredes traz consigo desafios em relação ao controle de tensão, sincronismo e controle de potência reativa. Para lidar com esses problemas, utilizam-se de inversores pois além de converter tensão contínua em alternada permitem controlar a potência injetada (ativa e reativa) e realizar funções de sincronismo. A operação coordenada da microrrede é garantida devido ao controle utilizado dos inversores para que cooperem entre si. Posteriormente serão tratados esses tipos de controles utilizados na cooperação de inversores em ambientes de microrrede.

1.1 OBJETIVO GERAL

Implementar e analisar um modelo de microrrede no ambiente MATLAB/Simulink, utilizando a metodologia de controle Droop para analisar a cooperação entre dois inversores trifásicos operando em paralelo, visando garantir estabilidade, sincronismo e equilíbrio de potência ativa e reativa.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Estudar os fundamentos teóricos das microrredes, com ênfase nas suas vantagens, limitações e desafios técnicos.

2. Investigar os principais tipos de controle aplicados a inversores em microrredes, destacando o controle Droop.
3. Simular um modelo de microrrede em MATLAB/Simulink contendo duas unidades inversoras conectadas em paralelo.
4. Implementar o controle Droop no modelo proposto, analisando sua resposta dinâmica e sua influência na estabilidade e na partilha de potência entre inversores.
5. Analisar as simulações em diferentes condições operacionais, verificando o desempenho do controle implementado quanto à regulação de tensão, frequência e equilíbrio de potência.
6. Discutir os resultados obtidos, destacando a importância dos métodos de controle na integração de fontes geradoras e na operação estável de microrredes.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho é organizado da seguinte forma: Capítulo 2 é a revisão bibliográfica. O Capítulo 3 conterá as informações acerca da modelagem computacional do inversor, microrrede e controlador no MATLAB/Simulink. No Capítulo 4 serão destacados os resultados e discussões. No Capítulo 5 será feita a conclusão do trabalho junto com as considerações finais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As Microrredes se enquadram no conceito de *Smart Grid*, pois proporcionam aumento nos níveis de confiabilidade, economia e qualidade ambiental, mediante a introdução de novas técnicas de automação e comunicação. Segundo [14] a idéia fundamental das Microrredes deriva da expansão da utilização da geração distribuída. Geradores isolados, conectados à rede elétrica próximos aos pontos de consumo e em diversos níveis de tensão, podem causar problemas de difícil solução, o que acarreta restrições de conexão bastante rígidas por parte das concessionárias.

De forma geral os elementos geradores em uma microrrede são provenientes de fontes renováveis como usinas fotovoltaicas, o problema é que atualmente, devido a grande quantidade de usinas fotovoltaicas instaladas no sistema elétrico não só brasileiro mas mundial, grandes usinas são desconectadas da rede principal devido ao contra fluxo de energia, o chamado “*curtailment*”. O trecho a seguir apresenta esta dificuldade:

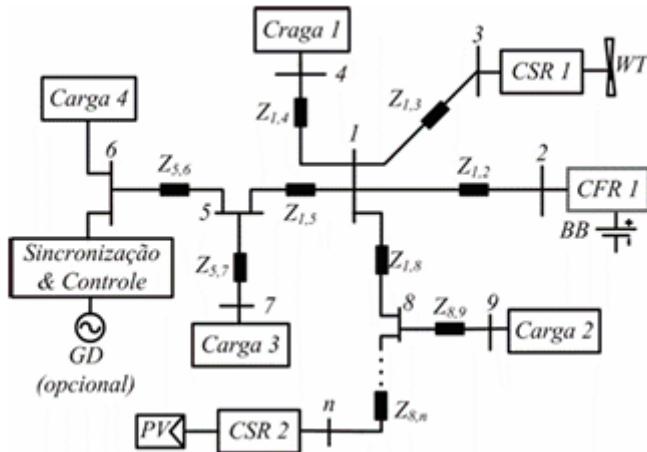
O excesso de oferta e a limitação de energia são amplamente causados por dois descompassos entre a geração de PV (oferta) e a carga (demanda). Primeiro, frequentemente há um descompasso temporal entre o momento em que a geração de PV está disponível (meio-dia) e quando essa geração pode ser absorvida pela rede. Naquele dia, o pico de geração de PV ocorreu ao meio-dia, quando a demanda era muito baixa para absorver a geração. O descompasso temporal é agravado pelo fato de que os sistemas de PV atrás do medidor reduzem a carga líquida da rede ao longo do dia, deixando menos carga para absorver a geração de PV em escala de utilidade pública. Em segundo lugar, pode haver um descompasso geográfico entre onde a geração de PV está disponível (áreas ensolaradas e secas) e onde essa geração pode ser absorvida (centros de carga) [13].

Um dos principais fatores que leva a essa tomada de decisão é devido aos aparelhos de proteção do sistema, mas não é o foco do trabalho tratar desse tema. Todavia serve para explicar a problemática de uma microrrede *on-grid*, que é na maioria dos contextos necessária pois durante a noite as usinas fotovoltaicas não produzem energia e na ausência de um sistema de armazenamento a microrrede deve ser conectada a rede da concessionária local, ou então em um contexto de geradores eólicos há momentos, mesmo no dia, em que não há geração. Dito isso, a escolha da topologia da microrrede tem que ter em vista a disponibilidade de uma rede próxima, por exemplo em comunidades isoladas a topologia

ideal é de uma microrrede isolada. Em [15] é apresentado um exemplo de topologia de microrrede para o caso de uma área isolada, com uma explicação derivada também de [15]:

As comunidades isoladas formam aglomerados do tipo vilas com as moradias geralmente dispersas sobre uma determinada área, que pode ser relativamente extensa. Nesses casos, uma topologia de rede em corrente alternada (CA), que permita a interligação das fontes de potência de forma distribuída, conforme ilustrado no exemplo da Figura 1, é desejável. Nessa figura CFR é um conversor formador da rede, que neste exemplo é aquele conversor com fluxo de energia bidirecional. Ele é responsável por formar a microrrede à qual os outros conversores serão conectados. Embora na Figura 1 este conversor esteja conectado ao banco de baterias, nada impede que o sistema de armazenamento seja formado por outro dispositivo. CSR é um conversor supridor da rede

Figura 1 - Exemplo de topologia de microrrede com as fontes de potência distribuídas.



Fonte [15]

A topologia apresentada permite fazer uma análise de elementos que não foram pontuados anteriormente como o conversor formador de rede (CFR) que está conectado à um banco de baterias, esse conversor é importante para garantir o correto funcionamento da microrrede, CFR é o elemento que forma a microrrede, pois nenhuma microrrede pode ser inteiramente baseada nas fontes renováveis geradores pois são fontes intermitentes. Com isso surge um desafio, coordenar corretamente os inversores conectados na microrrede de modo a garantir uma ótima curva de carga para cada inversor segundo suas demandas, para isso surgem diversas metodologias de controle, as quais serão exemplificadas nos próximos itens.

2.1 CONTROLE MESTRE ESCRAVO

O controle mestre-escravo é uma metodologia de controle que está em diversas aplicações, não somente nos inversores. Este controle se baseia no princípio de um dispositivo de referência (mestre) e outros que vão seguir essa referência (escravos). Na situação das microrredes, o inversor mestre estabelece a referência de tensão e frequência, por exemplo. Segundo [16] é necessário que haja um barramento de dados para a troca de informações entre as unidades. Ainda em [16] o autor estabelece algumas vantagens e desvantagens do método:

Vantagem

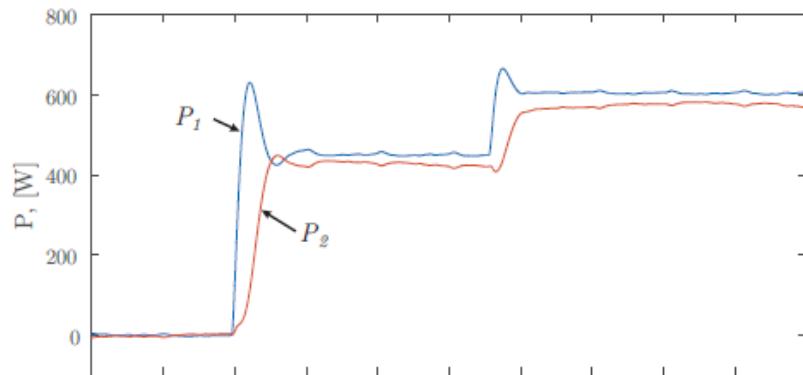
“Esta técnica apresenta grande eficiência na divisão de potência entre os inversores, facilidade na adição de novos inversores para aumento da capacidade de potência do sistema e boa flexibilidade operacional.”

Desvantagem

“Como principal desvantagem pode-se citar a presença de uma unidade externa de processamento de informação que reduz a robustez do sistema, pois não há possibilidade de operação mediante a falha do sistema central de controle e/ou comunicação.”

Em [17] o autor mostra duas curvas de potência ativa para cada inversor para este método de controle:

Figura 2 - Resultado do compartilhamento de potência ativa.



Fonte [17]

Por outro lado em [17], é dito sim que há uma desvantagem pelo fato de precisar de um canal de dados para a comunicação mas é apresentado uma evolução no método com a configuração “mestre-escravo autônoma (AMS)” em que o inversor mestre é configurado como fonte de tensão enquanto os outros escravos são fonte de corrente, essa topologia evita o uso de barramento de dados mas apresenta menor precisão na distribuição de potência dos inversores como pode ser observado na figura 2.

2.2 CONTROLE CENTRALIZADO

O controle centralizado também chamado de controle central baseia-se em um único controlador para todos os elementos de uma microrrede. O controlador central da Microrrede (MGCC) deve operar para, além de garantir uma rede estável com tensão e frequência pré-definidas, fazer com que as fontes geradoras interajam de modo a manter a microrrede operando pelo maior tempo possível, assim, visando garantir o correto funcionamento de energia elétrica até que a rede principal de distribuição seja restabelecida, [18].

Ou seja, o controlador determina os parâmetros da rede e adequa os inversores de modo a satisfazer as suas configurações. Em [16] o autor faz breves considerações sobre diversos métodos de controle para a cooperação dos inversores, e, sobre o controle central ele apresenta vantagens e desvantagens como as em destaque:

Vantagem

“Este método apresenta a possibilidade de operar de forma segura caso uma das unidades de potência seja retirada do sistema, pois permite flexibilidade operacional devido à comunicação e processamento centralizado das informações.”

Desvantagem

“A presença de uma unidade externa de processamento de informação que reduz a robustez do sistema, pois não há possibilidade de operação mediante a falha do sistema central de controle e/ou comunicação.”

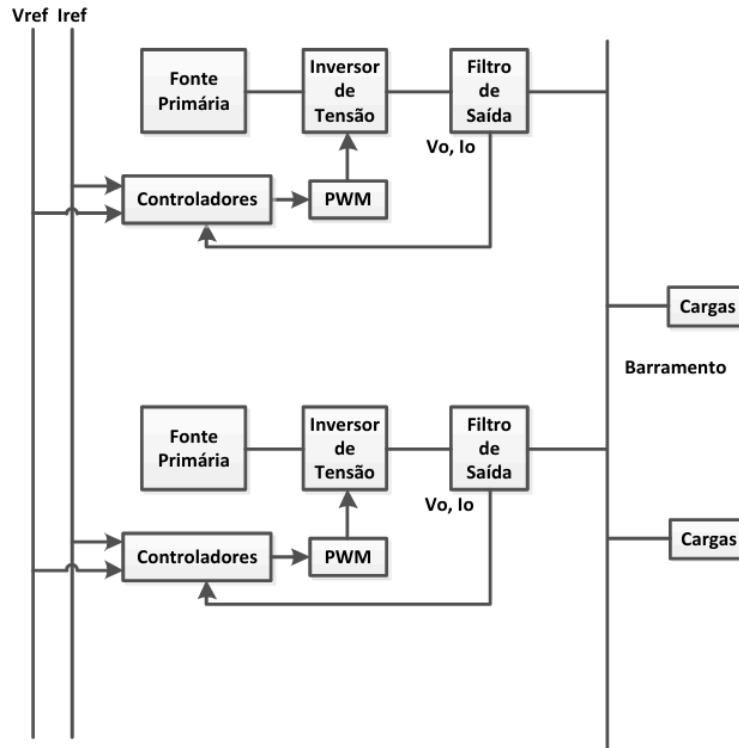
Em [19] é apresentado uma variação do controle centralizado que consiste no controle central-local, diferente do controle central, que depende totalmente do canal de comunicação, o controle central-local permite que os controladores locais mantenham a operação básica do sistema mesmo em caso de perda temporária de conexão com o centro de controle. Isso aumenta a robustez do sistema em caso de falhas; por outro lado é pouco

escalável, pois para uma rede com muitos inversores o controle se torna lento e a complexidade de coordenações aumenta tornando a instalação e configuração dos parâmetros dos controladores trabalhosa, encarecendo o sistema.

2.3 CONTROLE DESCENTRALIZADO

Também chamado de controle distribuído, surge como uma evolução do controle central, este método não possui uma unidade de controle e processamento de dados centralizado ao invés tem-se um barramento de dados com o qual os inversores compartilham de uma mesma referência.

Figura 3 - Exemplo de controle distribuído.



Fonte [16]

Os controladores vão processar os dados de referência com os medidos na saída do filtro LC dos inversores e a partir disso gerar a modulação PWM para o acionamento das chaves MOSFETS/IGBTs no inversor, de acordo com o erro entre o medido e a referência. Segundo [19]:

No controle descentralizado, não há a necessidade de programar a geração pelo operador do sistema de distribuição, pois a geração de potência ativa e reativa da MR é definida por seus controladores de modo que todas as fontes possam contribuir de forma coordenada, porém sem a necessidade de um sistema de comunicação entre elas para atingir os objetivos de controle de MR. O controle descentralizado utiliza o conceito plug-and-play, facilitando a expansão da MR sem que haja necessidade de efetuar grandes mudanças estruturais ou de controle.

Como foi mostrado por [19] e em comparação com o item anterior sobre o controle centralizado pode-se mostrar como vantagem e desvantagem a ausência da central de processamento de dados e controle. Isso melhora a robustez do sistema e pode ser vantajoso economicamente não ter essa unidade central de dados. Ao mesmo tempo que se torna mais robusto que o controle centralizado, este método ainda tem o problema para o caso do barramento de dados enfrentar sérios danos, e pode ser uma desvantagem esse barramento de dados em uma situação com muitos inversores pois haverá maior número de informações fluindo, ou seja a principal desvantagem deste método de controle é sua escalabilidade.

2.4 CONTROLE POR CURVA DE DECAIMENTO(DROOP)

Este método de controle se baseia nos princípios de máquinas síncronas e sistemas de potência. Segundo [21]:

O método droop baseia-se em um conceito bem conhecido em sistemas de potência de grande escala, que consiste em reduzir (droopar) a frequência do gerador CA quando sua potência de saída aumenta. [...] as potências ativa e reativa fornecidas ao barramento CA são medidas e suas médias são calculadas, sendo os sinais resultantes utilizados para ajustar a frequência e a amplitude da referência de tensão de saída do inversor UPS.

O controle droop ou por curva de decaimento usa de relações lineares para realizar o controle dos inversores, como pode ser visto nas equações abaixo:

$$f = f_{nom} - K_p(P - P_{ref}) \quad (1)$$

$$V = V_{nom} - K_q(Q - Q_{ref}) \quad (2)$$

$$K_p = \frac{\Delta f}{\Delta P} \quad (3)$$

$$K_q = \frac{\Delta V}{\Delta Q} \quad (4)$$

f : frequência

P : potência ativa

Q : potência reativa

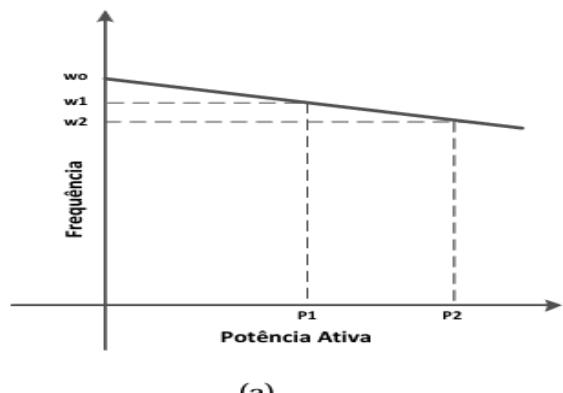
V : tensão

ref : valores adotados como referência

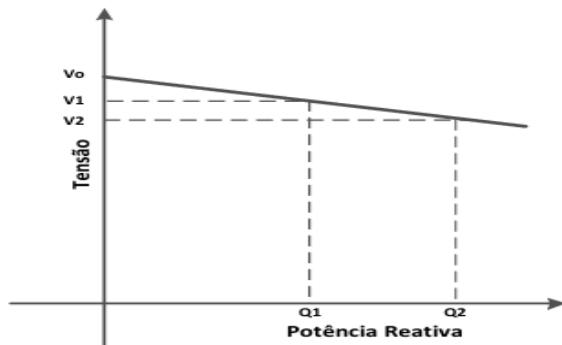
nom : valores nominais do sistema

Estas equações lineares expressam uma rampa como mostrado na imagem a seguir:

Figura 4 - (a) Curva de decaimento de potência ativa; (b) curva de decaimento de potência reativa.



(a)



(b)

Fonte [16]

O controle droop tem a característica de ser descentralizado e não precisar de uma unidade de controle central ou se basear nos parâmetros de um dos inversores; pelo contrário, o controle emula em cada inversor a dinâmica de uma máquina síncrona fazendo com que funcionem de forma independente, porém sincronizados. Em [16, 20] o autor apresenta algumas vantagens e desvantagens deste método de controle, sendo:

“A eficiência do sistema é elevada, visto ser possível a adequação de potência de cada unidade independentemente.”

“Outra grande vantagem de sistemas deste tipo é a confiabilidade, isto porque sem a comunicação entre as unidades a retirada de uma ou mais unidades não interrompe o fornecimento de energia às cargas, uma vez que as demais assumem a parcela de potência correspondente a unidade retirada do barramento de carga.”

Desvantagens

“Em aplicações de redes inteligentes, o controle por curvas de decaimento sofre desvantagem em relação a sistemas com comunicação de controle, pois cada inversor opera de modo independente de acordo com curvas de decaimento previamente definidas. Assim, mudanças de geração e carga exigirão que o sistema mude o ponto de operação necessitando-se então de um ajuste nas curvas de decaimento.”

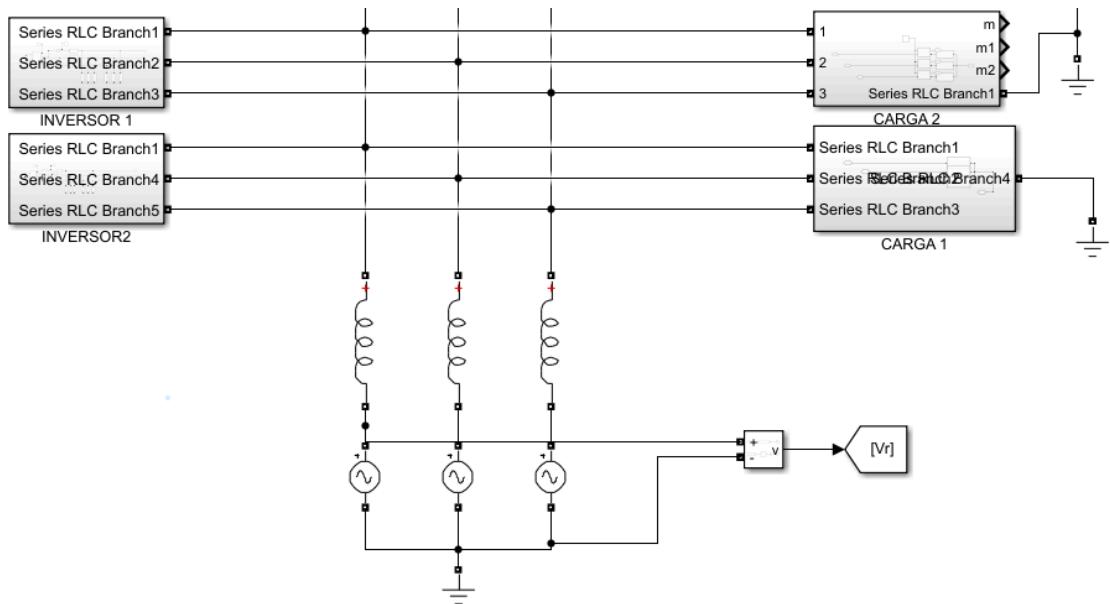
“Para sistemas isolados (stand-alone), o barramento de interconexão entre os inversores não apresenta essa característica. Logo, pode haver variações de amplitude e/ou frequência no barramento da carga. Neste caso a estabilidade do sistema deve ser cuidadosamente avaliada, pois variações de carga ou de geração podem perturbar o sistema de modo drástico.”

Como pode-se concluir, a aplicação deste método de controle se restringe a redes conectadas à rede da concessionária local, uma vez que são utilizados como referência os próprios parâmetros de tensão e frequência da rede, por isso em sistemas isolados pode haver variações de amplitude e/ou frequência nas cargas. A robustez do controle é uma forte vantagem mas carrega uma desvantagem em determinadas aplicações. Dentre os objetivos do presente trabalho está a simulação de uma microrrede com inversores em paralelo, o método de cooperação escolhido é o controle por curva de decaimento ou droop pois as vantagens se apresentaram mais significativas em relação às outras filosofias de controle uma vez que a microrrede a ser simulada no MATLAB/Simulink é conectada à rede local.

3 MODELAGEM DOS ELEMENTOS

A microrrede será composta por 2 inversores, a rede principal e uma carga trifásica variável. Esta carga trifásica que consiste inicialmente em uma carga resistiva, após um determinado tempo é adicionada uma outra carga em paralelo com características indutivas, como pode ser visto na figura 5. Após será investigado uma situação de transição para modo ilhado. Para adequado funcionamento, mesmo com variações súbitas de carga, a modelagem do inversor deve ser correta, ou seja, o filtro LC deve ser tal que seja garantida estabilidade e a correta filtragem da modulação dos MOSFETS presentes nos inversores. Para isso, usa-se de relações fundamentais presentes na eletrônica de potência segundo [24].

Figura 5 - Modelo de Microrrede desenvolvido.



Fonte autor.

3.1 FILTRO DE SAÍDA DOS INVERSORES

Sejam as equações abaixo:

$$f_c = \frac{f_s}{10} \quad (5)$$

$$\omega_c = 2\pi f_c \quad (6)$$

Onde:

f_c : frequência de corte filtro passa baixa

f_s : frequência onda portadora

ω_c : frequência angular de corte

Se considerar uma frequência da onda portadora de 20 kHz, então a frequência de corte é 2 kHz, portanto, o valor de ω_c é 12,5 k rad/s. A escolha adequada do filtro LC exige que seja calculado o valor da resistência R que vai operar como elemento amortecedor, foi escolhido um coeficiente de amortecimento ξ entre 0,707 e 1 pois o valor de ξ não deve ser grande para evitar respostas lentas e perdas de potência, por outro lado um valor muito baixo ξ significa um valor muito baixo de amortecimento, o que implica em uma insuficiência para o amortecimento do sinal, ou seja, variações de carga podem levar a instabilidade. Dito isso foi escolhido um $\xi = 0,77$ e $R = 25\Omega$.

A partir de função de transferência do filtro igualada a função de transferência desejada:

$$G_{filtro} = \frac{\omega_c^2}{s^2 + 2\xi\omega_c s + \omega_c^2} = \frac{\frac{1}{LC}}{s^2 + \frac{1}{RC}s + \frac{1}{LC}} \quad (7)$$

Implica em:

$$C_{filtro} = \frac{1}{2R\xi\omega_c} \quad (8)$$

$$L_{filtro} = \frac{1}{\omega_c^2 C_{filtro}} \quad (9)$$

Onde:

C_{filtro} : Capacitor filtro

L_{filtro} : Indutor filtro

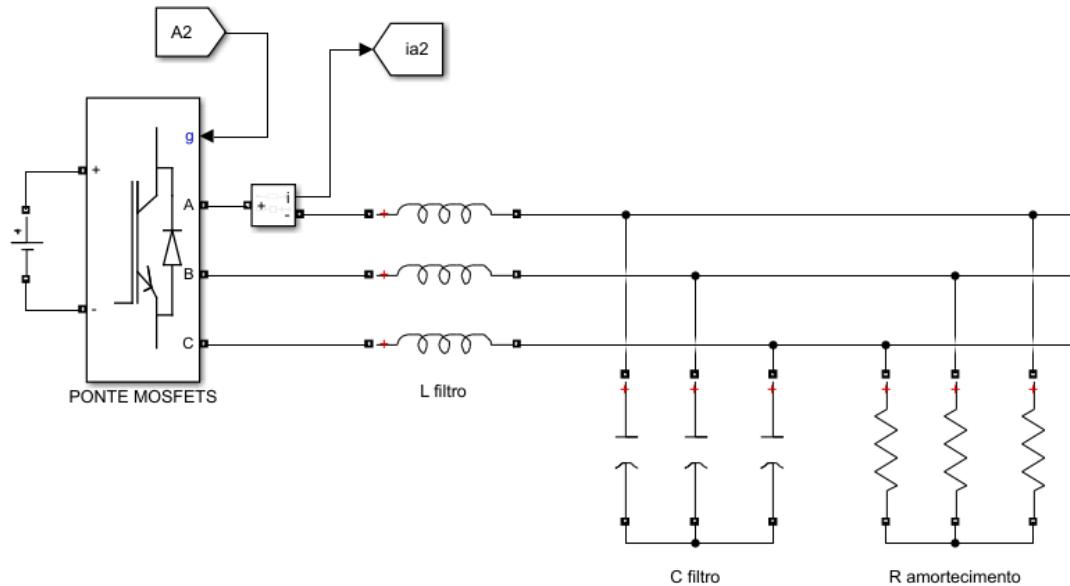
Pode-se, então calcular os valores de LC do filtro para o inversor presente na figura

6. Logo, os valores do indutor e capacitor filtro são:

$$L = 1,3 \text{ mH}$$

$$C = 5 \mu\text{F}$$

Figura 6 - Bloco inversor trifásico.



Fonte autor.

Somente os valores de LC e R não são suficientes. É importante saber exatamente o valor da tensão (V_{DC}) necessária na entrada CC do inversor. A tensão eficaz de linha da rede da concessionária é 220 V_{RMS} , como o sistema é trifásico o valor da tensão de fase é 127 V_{RMS} ou $180V_{pico}$. Isso significa que, se for utilizado um coeficiente de modulação $m_a = 0,9$, então o valor de V_{DC} será 400 V.

3.2 CONTROLE DROOP

A etapa fundamental e o foco principal do presente trabalho é o controle por curva de decaimento ou droop. O correto cálculo de K_p e K_q é o primeiro estágio a ser feito. Esses valores determinam a sensibilidade, velocidade do controle além da estabilidade. Segundo [25] há limites para a variação de frequência e tensão, ΔV_{max} é entre 5 a 10% e Δf_{max} é entre 0,5 a 1 Hz. A partir de (3) e (4) observa-se que além desses valores máximos de variações de tensão e frequência, tem-se os valores de base para potência ativa e reativa. A escolha não é arbitrária, na verdade é ideal que a base de potência reativa seja 0 VAr para não afetar no fator de potência do sistema bem como reativos. O cálculo da potência ativa base é feita a partir do projeto do inversor:

$$P_{ref} = \frac{V_{rms}^2}{R} \quad (9)$$

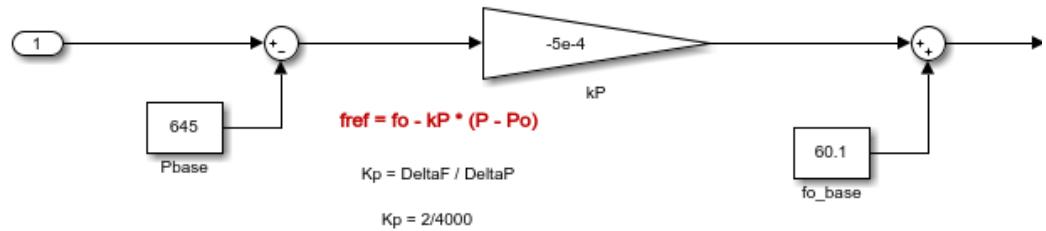
Logo P_{ref} é 645 W, $Q_{ref}=0$ VAr, $f_{nom}=60$ Hz, $V_{nom}=127$ V. O cálculo de K_p e K_q foi calculado segundo (3) e (4). Considerando ΔP e ΔQ , 4000 W e 8000 Var, respectivamente e os devidos limites de variação de tensão e frequência, como comentado anteriormente, foram calculado os valores para as constantes K_p e K_q iguais respectivamente à 5e-4, 3,2e-3, logo as equações (1) e (2) podem ser reescritas:

$$f = 60,1 - 0,0005 \cdot (P - 645) \quad (10)$$

$$V = 127 - 0,0032 \cdot Q \quad (11)$$

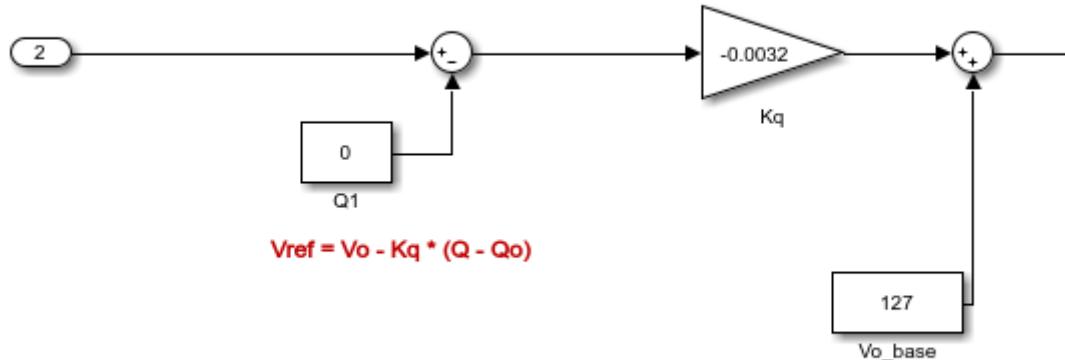
Essas equações foram implementadas no Simulink usando diagrama de blocos:

Figura 7 - Diagrama de blocos Potência Ativa.



Fonte autor.

Figura 8 - Malha Potência Reativa.



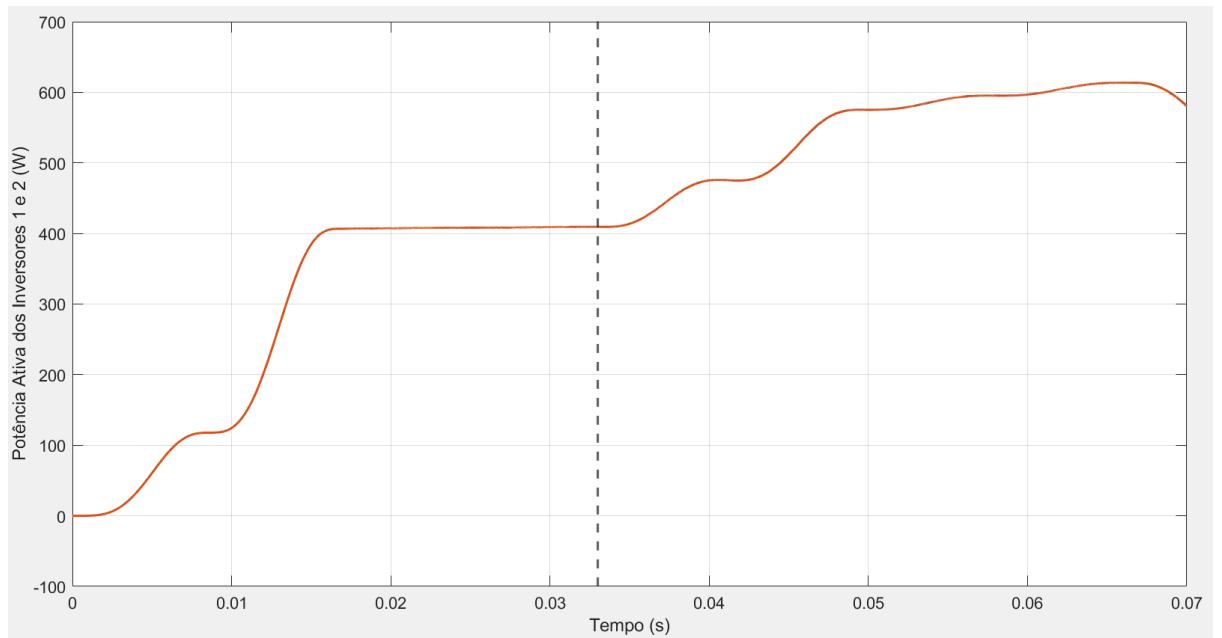
Fonte autor.

Vale fazer algumas considerações, como pode ser visto na equação (12) ou na figura 6, a frequência base utilizada foi de 60,1 Hz e não 60 Hz como o nominal da rede. Isso foi feito porque, mesmo na presença da rede operando em 60 Hz, o inversor produza um avanço de fase resultando um fluxo de potência ativa para o barramento da rede. Se fosse utilizado 60 Hz o controle funcionaria, mas teria uma resposta mais lenta para a injeção de potência. O outro inversor a ser colocado em paralelo é igual ao que foi calculado por fins de simplificação e o sistema inicialmente parte através de um bloco de PLL e em seguida o droop é acionado.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

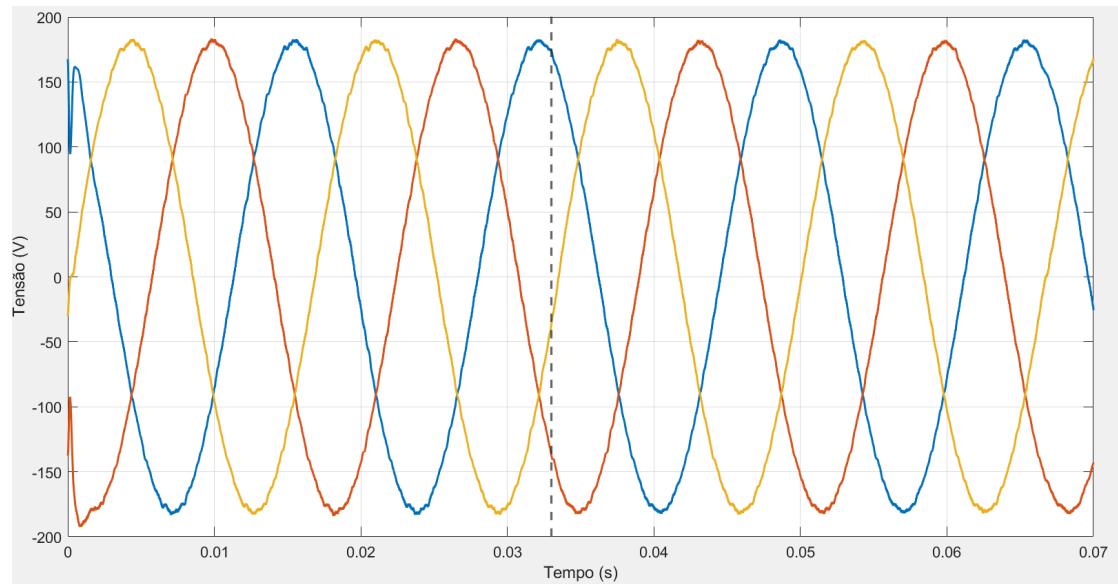
Como dito anteriormente, o sistema não parte inicialmente com o controlador droop conectado, mas sim a partir de um PLL, pois o PLL irá estabelecer corretamente os parâmetros que o controlador vai utilizar, se isso não for obedecido por conta dos parâmetros serem mal computados o sistema pode se tornar instável e caótico. Por conta dos parâmetros do filtro dos inversores serem iguais e a carga serem as mesmas, a curva de potência ativa e reativa que serão mostradas são as mesmas. A figura 8(a) mostra o instante que ocorre essa troca e também como a potência parece estabilizar depois de 0,02 segundos pelo PLL, enquanto a figura 8(b) pode ser observado a estabilização da forma de onda de tensão, a figura 8(c) mostra a estabilização em regime permanente e a figura 8(d) mostra a estabilização em um caso específico de uma impedância de ligação conectada entre o inversor 2 e a rede com o objetivo de não mais deixar iguais a dinâmica das curvas dos inversores, porém com a devida estabilização em regime permanente. Em todas imagens está marcado o instante em que ocorre a transição:

Figura 8(a) - Potência ativa dos Inversores (Transição PLL - Droop)



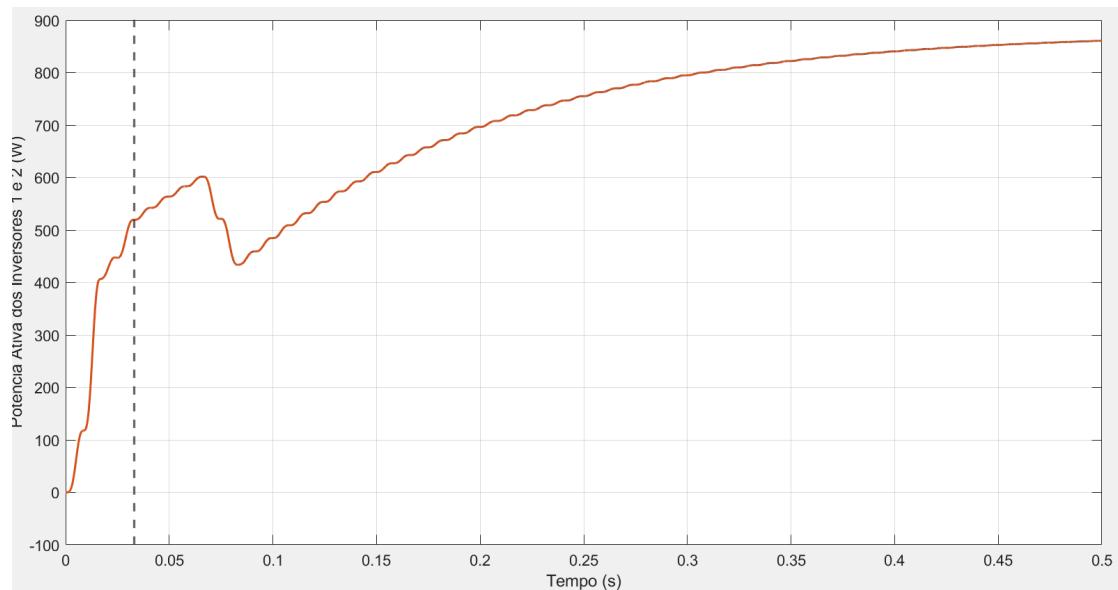
Fonte Autor

Figura 8(b) - Tensão nas fases do inversor



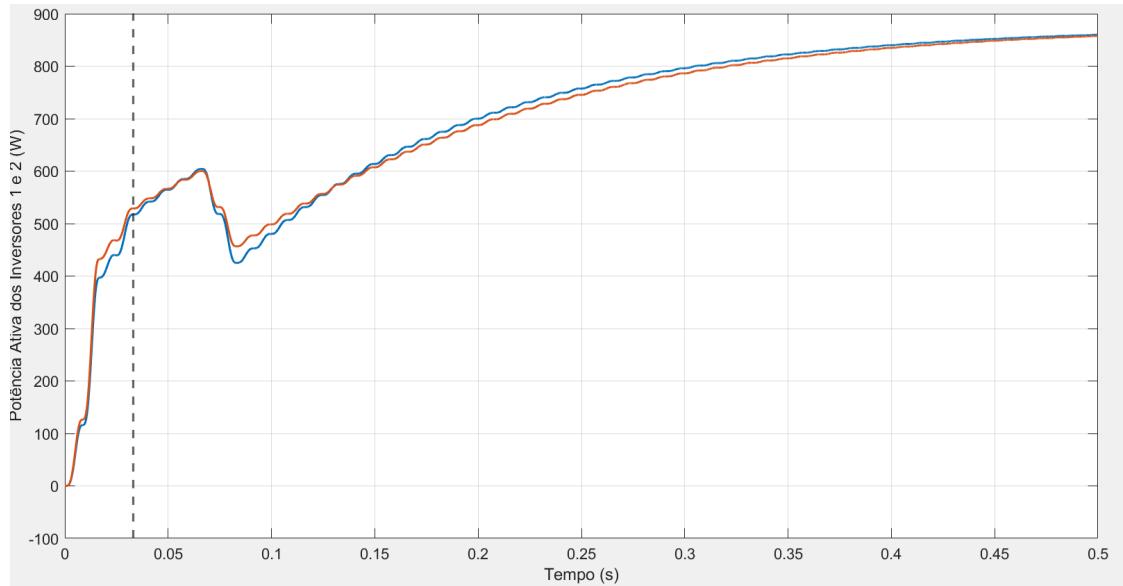
Fonte Autor

Figura 8(c) - Estabilização dos inversores com controle droop em regime permanente



Fonte Autor

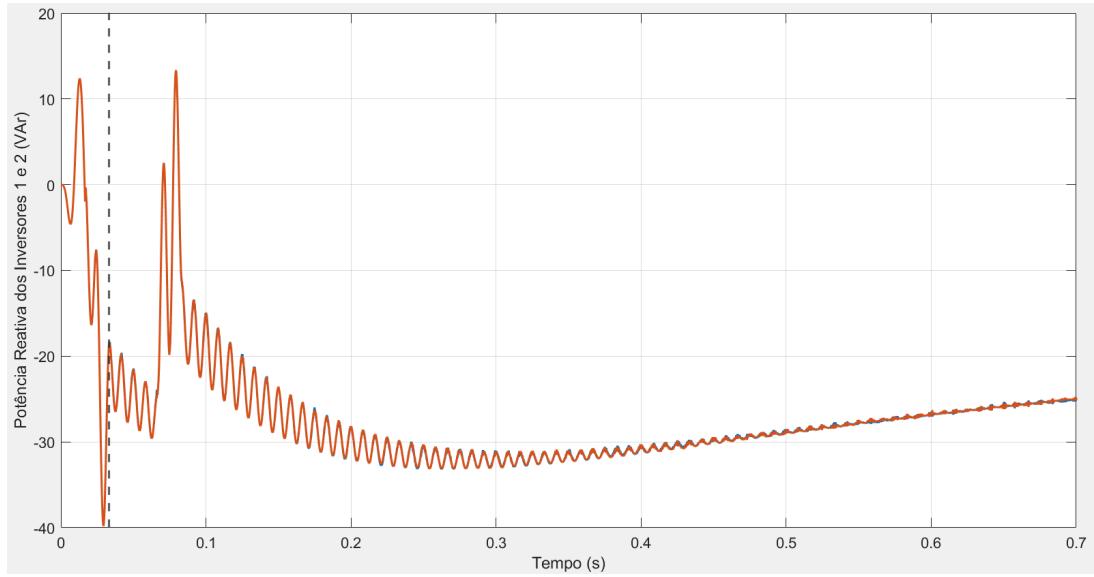
Figura 8(d) - Estabilização em regime permanente com impedância de ligação diferente



Fonte Autor

Na simulação anterior a troca para controle droop ocorre após 2/60 segundos ou 2 ciclos. Com base no resultado pode-se reduzir o tempo da troca para 1 ciclo. A figura 8(d) representaria uma situação mais próxima da realidade onde inversores podem ser conectados em pontos diferentes na rede de modo que a impedância entre os inversores seja diferente, distorcendo a curva de potência ativa entre eles. Na figura 8(c) pode ser observado um aumento de potência ativa, no momento da troca, em direção a estabilização, o deslocamento de fase para direcionar o fluxo de potência para o barramento, além do valor de tensão, que modifica a entrega de potência ativa e reativa de modo a adequar os valores de frequência e tensão como pode ser visto na figura 9:

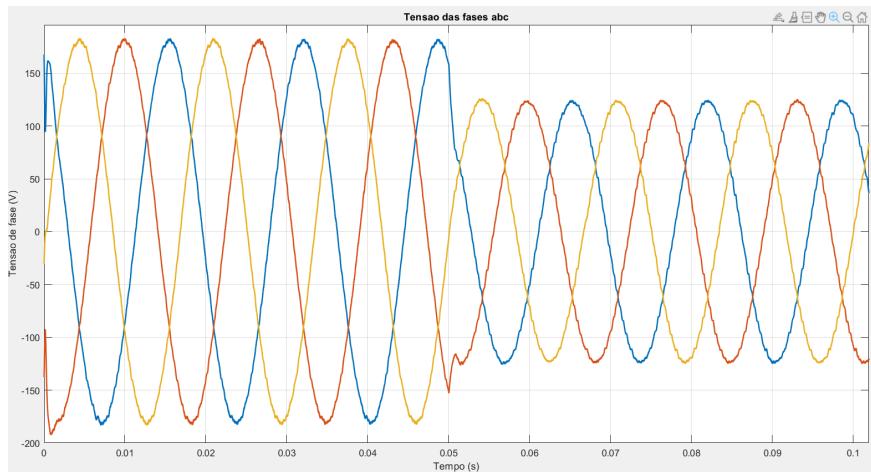
Figura 9 - Potência Reativa dos Inversores



Fonte Autor

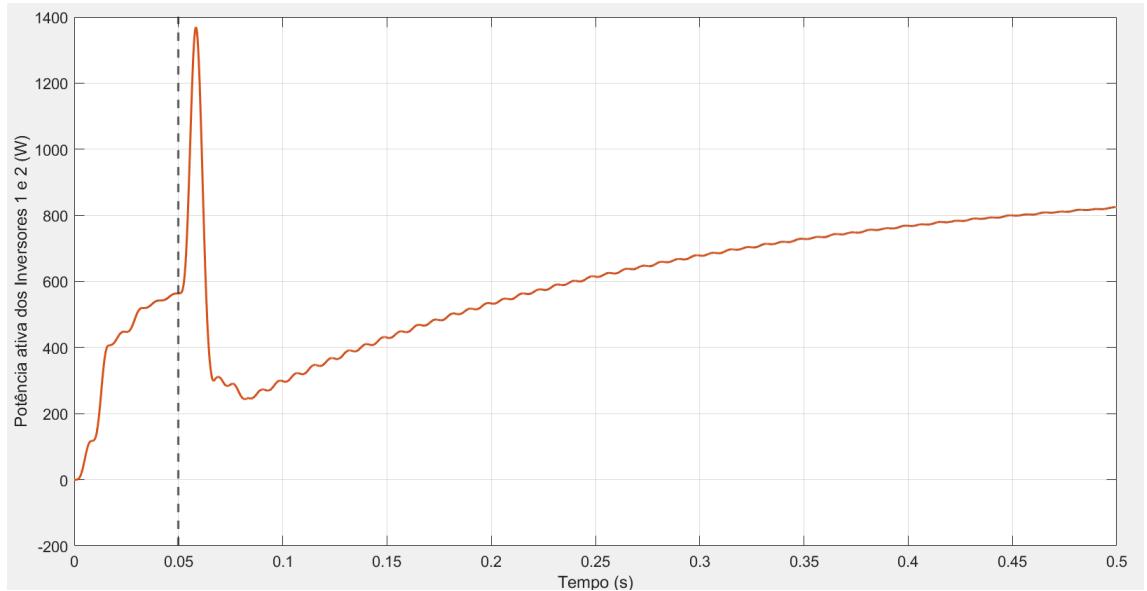
Em seguida foi simulado, com a adição de uma carga indutiva no tempo de 3 ciclos de 60 Hz, uma carga de 5 mH/fase. Como mostrado na figura 10(a) a amplitude de tensão cai, isso é comum quando se aciona grandes cargas indutivas como motores pois a impedância da carga vai aumentar resultando em uma queda de tensão maior. Já na figura 10(b) é mostrado a curva de potência ativa. Nessa curva pode ser observado um pico de potência, isso vai ocorrer devido ao pico de corrente que vai surgir no momento que a carga é inserida, o ângulo de carga também vai aumentar e o controle droop vai reduzir a frequência de modo a adequar o sistema em direção ao equilíbrio. A potência reativa, figura 10(c), aumenta como é de se esperar pois a carga indutiva vai consumir mais reativos. Em todas imagens está marcado o instante em que ocorre a inserção da carga:

Figura 10(a) - Tensão das fases abc do Inversor(2º caso)



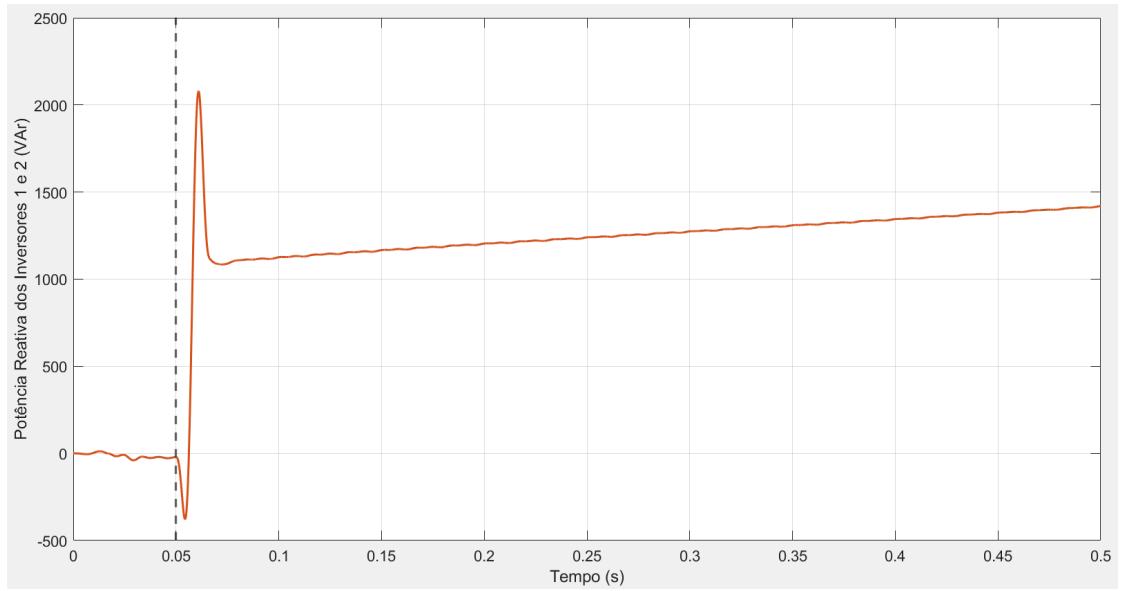
Fonte Autor

Figura 10(b) - Potência Ativa dos Inversores(2ºcaso)



Fonte Autor

Figura 10(c) - Potência Reativa dos Inversores(2ºcaso)

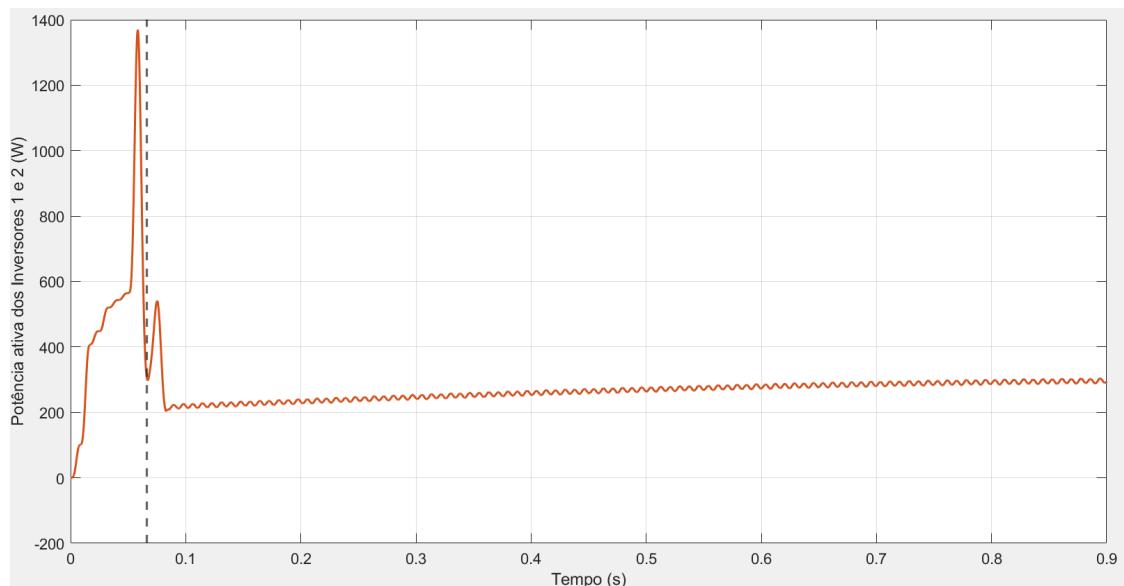


Fonte Autor

Em microrredes é comum que se faça o processo de troca para o modo ilhado, ou seja desconectado da rede principal, essa troca se justifica em diversas situações como segurança para uma possível manutenção futura. Dito isso é importante mostrar a dinâmica dessa troca e garantir estabilidade. Na figura 11(a) pode ser visto que ao desconectar a rede há um segundo pico na curva de potência ativa e que depois o sistema se estabiliza. Ao retirar a rede, se perde a referência de tensão e frequência e o controle droop assume para manter as

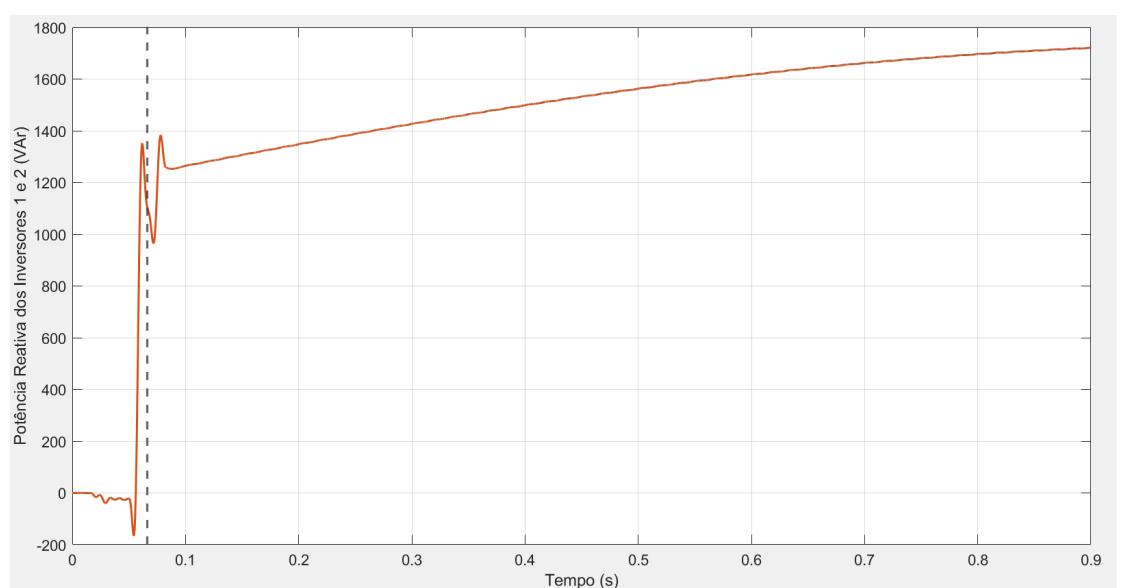
características da rede, ou seja, o controle vai funcionar como uma memória para operar a si mesmo. Na figura 11(b) observamos o segundo pico na potência reativa, com essas duas imagens pode-se demonstrar mais uma vez que o controle droop utiliza as mesmas relações de sistemas elétricos de potência para estabilizar os parâmetros de tensão e frequência. Na figura 12 é mostrado que mesmo que a dinâmica das curvas de potência ativa dos inversores sejam diferentes, o sistema tende ao equilíbrio em regime permanente. Em todas imagens está marcado o instante em que ocorre a transição para o modo ilhado:

Figura 11(a) - Potência ativa dos Inversores (desconexão da rede)



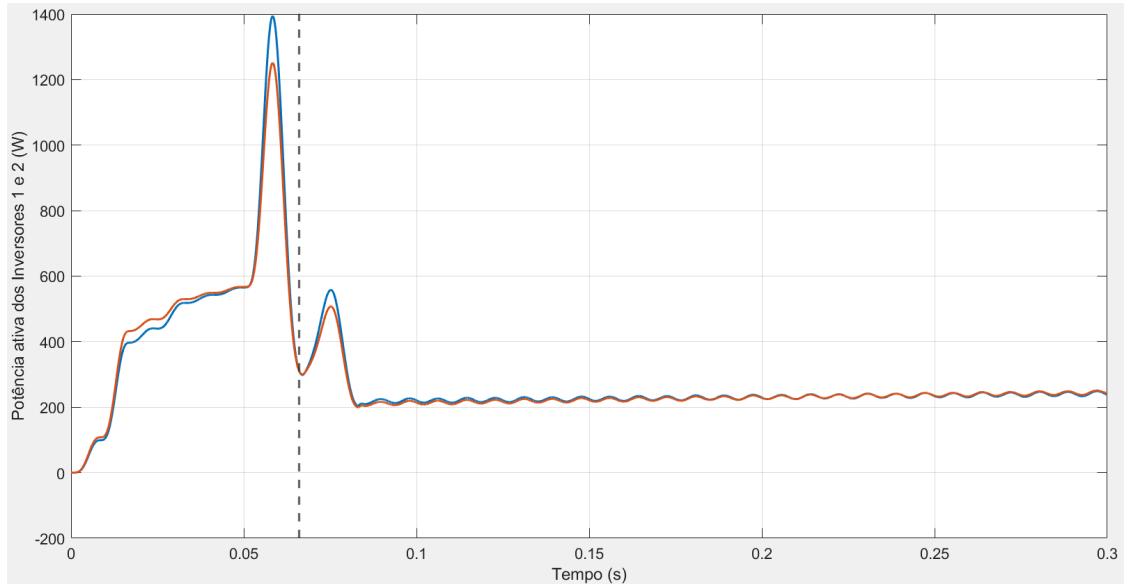
Fonte Autor

Figura 11(b) - Potência reativa dos Inversores (desconexão da rede)



Fonte Autor

Figura 12 - Potência ativa dos Inversores + impedância de ligação diferentes(desconexão da rede)



Fonte Autor

De forma geral, os resultados obtidos nas simulações mostram que o sistema de inversores em paralelo operou de forma coerente com a teoria do controle droop e de outras informações teóricas apresentadas. Inicialmente, observou-se que os inversores praticamente não injetavam potência enquanto conectados à rede, já que o sincronismo via PLL força tensão e frequência a seguir rigidamente os valores da concessionária, deixando a rede suprir quase toda a carga. Com a ativação do controle por droop, entretanto, registrou-se um aumento gradual da potência ativa e reativa fornecida pelos inversores, resultado esperado devido ao ajuste automático da frequência e da tensão conforme as curvas P-f e Q-V, que são características fundamentais de sistemas de potência o qual o controle droop simula. A inserção de cargas resistivas e indutivas produziu quedas momentâneas de tensão, picos transitórios de potência e aumento da circulação de potência reativa. Por fim, a desconexão da rede e a consequente mudança para o modo ilhado resultaram em uma nova condição dinâmica, onde os inversores passaram a sustentar integralmente a tensão e a frequência da microrrede. Essa transição provocou picos transitórios naturais, seguidos de acomodação estável, evidenciando o papel essencial do droop na manutenção da estabilidade e no compartilhamento de potência entre unidades paralelas. Assim, pode-se concluir que os resultados confirmaram o adequado funcionamento do paralelismo de inversores controlados pelo controle droop, bem como a sua capacidade de suportar perturbações, operar em microrrede ilhada e compartilhar potência. O uso de inversores cooperando entre si devido ao

controle droop possibilita a formação de redes mais resilientes, prontas para atender às novas demandas do sistema elétrico.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Inicialmente, o presente Trabalho de Conclusão de Curso permitiu aprofundar os conhecimentos na área de eletrônica de potência aplicada a microrredes e controle, destacando-se o estudo do paralelismo de inversores, técnicas de sincronização e estratégias de controle distribuído, que se mostra um método de controle robusto. Por meio de simulações desenvolvidas no software MATLAB/Simulink, foi possível analisar o comportamento dinâmico de inversores trifásicos conectados em paralelo, avaliando desde a etapa de sincronização com a rede principal via PLL até o funcionamento sob controle droop e operação em modo ilhado. Pode-se concluir com base nos resultados obtidos que o objetivo principal foi alcançado: implementar uma microrrede em ambiente computacional para compreender e demonstrar a operação cooperativa entre múltiplos inversores em diferentes condições de carga e conexão.

Diante do cenário atual de transição energética e crescente inserção de fontes renováveis, sistemas de microrredes ganham relevância por possibilitarem maior autonomia, flexibilidade operacional e resiliência. Nesse contexto, o controle droop se destaca como uma técnica fundamental para o compartilhamento de potência entre unidades geradoras a partir dos inversores, contribuindo para a estabilidade do sistema mesmo na presença de distúrbios de carga e mudanças na topologia da rede.

Conforme foi discutido, a inserção de cargas resistivas ou indutivas impacta diretamente o equilíbrio de potência ativa e reativa, afetando o comportamento do sistema e exigindo respostas rápidas e estáveis dos inversores. Da mesma forma, a operação ilhada, embora essencial para garantir a continuidade de serviço em situações de falha da rede principal, demanda estratégias de controle confiáveis para evitar instabilidades. Assim, os resultados reforçam que desenvolver técnicas de controle que conciliam precisão, agilidade e robustez, são características cada vez mais importantes em sistemas modernos de geração distribuída.

Em síntese, este estudo demonstrou que a integração entre inversores operando sob controle droop representa uma solução eficiente e tecnicamente viável para aplicações em microrredes, contribuindo para a evolução de sistemas elétricos mais autônomos e resilientes. As análises realizadas evidenciam o potencial da tecnologia e ressaltam a importância de trabalhos futuros voltados à otimização dos parâmetros de controle e à redução de distúrbios

transitórios, consolidando um caminho para o acesso a uma energia mais sustentável e confiável.

REFERÊNCIAS

- [1] ANDISHGAR, Mohammad Hadi; GHOLIPOUR, Eskandar; HOOSHMAND, Rahmat-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
- [2] SCHIFFER, Johannes; ORTEGA, Romeo; ASTOLFI, Alessandro; et al. Conditions for stability of droop-controlled inverter-based microgrids. *Automatica*, v. 50, n. 10, p. 2457-2469, 2014
- [3] GREEN, T. C.; PRODANOVIĆ, M. Control of inverter-based micro-grids. *Electric Power Systems Research*, v. 77, n. 9, p. 1204-1213, 2007
- [4] BELLIDO, Marlon Max Huamaní. Microrredes elétricas: uma proposta de implementação no Brasil. 2018. Tese (Doutorado em Planejamento Energético) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2018.
- [5] SURYANARAYANAN, S.; MANCILLA-DAVID, F.; MITRA, J.; LI, Y. Achieving the smart grid through customer-driven microgrids supported by energy storage. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRIAL TECHNOLOGY, 2010, Via del Mar. Proceedings... Via del Mar: IEEE, 2010. p. 884–890.
- [6] MIÑAMBRES-MARCOS, Víctor; ROMERO-CADAVAL, Enrique; GUERRERO-MARTÍNEZ, Miguel A.; MILANÉS-MONTERO, María Isabel. Cooperative operation of inverters for grid-connected photovoltaic generation systems. *Electric Power Systems Research*, v. 96, p. 47-55, 2013.
- [7] N. Mahmud, A. Zahedi and A. Mahmud, "A Cooperative Operation of Novel PV Inverter Control Scheme and Storage Energy Management System Based on ANFIS for Voltage Regulation of Grid-Tied PV System," in *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 13, no. 5, pp. 2657-2668, 2017.

- [8] ALHASNAWI, Bilal Naji; JASIM, Basil H.; ISSA, Walid; ESTEBAN, M. Dolores. A novel cooperative controller for inverters of smart hybrid AC/DC microgrids. *Applied Sciences*, v. 10, n. 17, p. 6120, 2020.
- [9] MORTEZAEI, Ali; AL-DURRA, Ahmed; SIMOES, Marcelo Godoy; MARAFAO, Fernando Pinhamel. Coordinated operation in a multi-inverter based microgrid for both grid-connected and islanded modes using conservative power theory. *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2015, Montreal. 2015.
- [10] CHOWDHURY, S. P.; CROSSLEY, P.; CHOWDHURY, S. Microgrids and Active Distribution Networks. [S.l.]: Institution of Engineering and Technology, 2009. 329 p. (Renewable Energy Series 6).
- [11] ACKERMANN, T.; ANDERSSON, G.; SÖDER, L. Distributed Generation: A Definition. *Electric Power Systems Research*, v. 57, 2001.
- [12] PEPEMANS, G.; DRIESEN, J.; HAESELDONCKX, D.; BELMANS, R.; D'HAESELEER, W. Distributed Generation: Definition, Benefits and Issues. *Energy Policy*, v. 33, 2005.
- [13] O'SHAUGHNESSY, Eric; CRUCE, Jesse R.; XU, Kaifeng. Too much of a good thing? Global trends in the curtailment of solar PV. *Solar Energy*, v. 208, p. 1068–1077, 15 Sept. 2020.
- [14] FALCÃO, Djalma M. Smart grids e microrredes: o futuro já é presente. In: SIMPÓSIO DE AUTOMAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS – SIMPASE, 8., 2019, Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: CIGRÉ-Brasil, 2019.
- [15] MATOS, José Gomes de; RIBEIRO, Luiz Antonio de Souza; SILVA, Felipe Simões Freitas e. Controle da potência gerada em microrredes autônomas e isoladas com fontes de energia renováveis e sistema de armazenamento com bancos de baterias. São Luís: Instituto de Energia Elétrica, Universidade Federal do Maranhão, 2014.

- [16] RIBEIRO, Pedro Eugênio Marcondes Justino. Controle do paralelismo de inversores em sistemas de micro-redes para variados pontos de operação. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2012.
- [17] PEREIRA, Alex S.; AZEVEDO, Gustavo M. S.; BRADASCHIA, Fabrício; CAVALCANTI, Marcelo C. Compartilhamento de carga em microrredes usando uma técnica mestre-escravo sem comunicação. Recife: Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, 2019.
- [18] BRESSANINI, Gabriel Lucas. Simulação de uma microrrede AC com controle centralizado. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas, Departamento de Automação e Sistemas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas, 2023.
- [19] ZHANG, Ziqi; LI, Peng; JI, Haoran; ZHAO, Jinli; XI, Wei; WU, Jianzhong; WANG, Chengshan. Combined central-local voltage control of inverter-based DG in active distribution networks. *Applied Energy*, v. 372, 123813, 15 Oct. 2024.
- [20] GODOY, R. B.; 2010. Paralelismo de inversores monofásicos, isolados ou em conexão com a rede, com otimização da resposta dinâmica. Tese de doutorado – Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, SP.
- [21] GUERRERO, Josep M.; LOOT, J.; GREEN, Tim C. Modeling, analysis and testing of autonomous operation of an inverter-based microgrid. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 22, n. 2, p. 613-625, 2007.
- [22] SADEQUE, Fahmid; MIRAFZAL, Behrooz. Cooperative inverters to overcome PLL malfunctions. *IEEE Transactions on Smart Grid*, v. 12, n. 3, p. 2137-2147, 2021.
- [23] COSTA, Paulo Moisés Almeida da. Regulação da integração de microgeração e microrredes em sistemas de distribuição de energia eléctrica. 2008. Dissertação (Doutorado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2008.
- [24] HART, Daniel W. Eletrônica de potência: análise e projetos de circuitos. Tradução de Antônio Pertence Júnior Romeu Abdo. 1. ed. Porto Alegre: AMGH, 2011.

[25] IEEE Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces. IEEE Std 1547-2018. New York: IEEE, 2018.