



# Análise da Atuação do Controle Secundário em Microrredes de Energia Elétrica

## Analysis of Secondary Control Performance in Insulated Microgrids

Fabrizio Márcio Arão Gomes Filho<sup>1</sup>, Bruno de Nadai Nascimento<sup>2</sup>

### RESUMO

Nos últimos anos, os sistemas elétricos de potência vêm passando por significativas mudanças no que diz respeito aos avanços tecnológicos, principalmente por conta das implementações de novas tecnologias de geração de energia elétrica. No atual cenário brasileiro, boa parte da energia gerada provém de fontes renováveis, fato este que aliado ao avanço da geração distribuída conectada localmente converge para o conceito de microrredes. Dentre as características de uma microrrede, a capacidade de operar de modo ilhado se sobressai, demandando assim ações por parte do centro supervisorio necessárias à operação do sistema elétrico dentro dos critérios de qualidade e confiabilidade no fornecimento. Ressalta-se, portanto, a importância do controle secundário, o qual deve identificar uma violação de tensão e frequência no sistema elétrico e corrigi-las através da atuação deste na atuação dos valores de referência dos geradores. O presente artigo propõe analisar o fluxo de potência para um micro rede, e realizar uma comparação da atuação do controle secundário no sistema estudado, através da implementação de um algoritmo que irá apresentar os perfis de frequência, tensão e as potências antes e pós atuação do controle para um sistema teste do IEEE.

**PALAVRAS-CHAVE:** controle secundário, fluxo de potência, microrredes, sistema elétrico de potência

### ABSTRACT

Nowadays, electrical power systems have been undergoing significant changes related to technological advances, mainly due to the implementation of new electrical energy generation technologies. In the current Brazilian scenario, much of the energy generated comes from renewable sources, a fact that combined with the advancement of locally connected distributed generation converges towards the concept of microgrids. Among the characteristics of a microgrid, the ability to operate the islanded mode stands out, requiring actions from the supervision center, allowing the operation of the electrical system within inadequate quality and reliability criteria. Therefore, the importance of secondary control is highlighted, which identifies voltage and frequency violations in the electrical system and correct them through its action on the generators' reference values. This article proposes to analyze the power flow for a microgrid, and a comparison of the performance of the secondary control carried out in the trained system, through the implementation of an algorithm that will present the frequency, voltage and power profiles before and after the action control for an IEEE test system.

**KEYWORDS:** secondary control, load flow, microgrids, electrical power systems

### INTRODUÇÃO

Com o avanço da tecnologia nos campos da eletrônica de potência, termos como microrredes surgiram e proporcionaram uma reestruturação do setor de energia elétrica. Uma consequência dessa

<sup>1</sup> Bolsista de iniciação científica: CNPQ. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Apucarana, Paraná, Brasil. E-mail: [fabriciofilho@alunos.utfpr.edu.br](mailto:fabriciofilho@alunos.utfpr.edu.br). ID Lattes: 2987158064982696.

<sup>2</sup> Docente no Curso de Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Apucarana, Paraná, Brasil. E-mail: [brunonascimento@utfpr.edu.br](mailto:brunonascimento@utfpr.edu.br). ID Lattes: 0236505514444560.



mudança de paradigma no setor foi a descentralização da produção de energia, fazendo com que geração de energia distribuída passasse a contribuir de forma significativa com demandas de energia ao longo a nível de distribuição. Com a penetração destas fontes que geralmente são renováveis e não controladas, as microrredes surgem como uma maneira de solucionar problemas inerentes ao aumento da demanda, trazendo mais confiabilidade e qualidade com relação à distribuição de energia elétrica. (PAIVA et al., 2019)(SOARES; OLIVEIRA, 2022)

Microrredes são conjuntos de cargas e recursos energéticos distribuídos e interconectados, que agem como uma única entidade controlável. Elas têm a capacidade de operar tanto em conexão com a rede principal quanto de forma autônoma.(HATZIARGYRIOU, 2014) Entre os modos de operação de uma microrrede, o modo conectado visa minimizar aspectos econômicos e técnicos da operação do sistema como um todo; o modo de ilha tem como prioridade a sobrevivência da microrrede, e o modo de transição entre estes dois modos citados anteriormente, possibilitando à microrrede flexibilidade operativa.(MORAES et al., 2022).

Este estudo teve como principal objetivo estudar e analisar o impacto do controle secundário em microrredes operando de maneira ilha (as quais possuem uma grande influência de penetração de energias de fontes renováveis do sistema principal de distribuição). Nesta condição é necessária a adequação do controle secundário, no intuito de garantir aos consumidores destas microrredes um fornecimento de energia de acordo com os parâmetros e os limites exigidos principalmente aos serviços essenciais, independente das intempéries. O estudo ainda prevê por meio dos métodos de aplicação que foram usados uma maneira de adaptar o controle secundário ao perfil do consumidor. (NADAI NASCIMENTO, 2019)

## MÉTODOS

Para o desenvolvimento do algoritmo referente aos estudo e à análise desenvolvida neste projeto, foi utilizado como base o método desenvolvido em (MUMTAZ et al., 2016), o qual é uma formulação do Método de Newton Rapson que e muito utilizado para a análise estática microrredes. Neste método, definem-se os tipos de barras da rede, sendo elas, do tipo PQ: onde a potência ativa e reativa da barra são valores conhecidos; tipo PV: a magnitude da tensão e a potência ativa são conhecidas; tipo VF: que caracterizam gerados com *droop*, proporcionando assim a alteração da tensão terminal e da frequência do sistema em função das variações de carga. Convém ressaltar que geradores com *droop* emulam o comportamento de máquinas síncronas convencionais em interfaces eletrônicas conectadas a geradores despacháveis de pequeno porte. Para o Método de Newton Rapson tradicional, é necessário a compreensão da formulação do problema a ser resolvido, o qual pode ser visto de maneira minuciosa em (MUMTAZ et al., 2016). Contudo, para a análise proposta deste trabalho o tem-se uma nova elaboração do problema, onde há a presença do controle secundário na formulação deste método, por conta da presença do efeito *Droop*, as seguintes expressões algébricas demonstram a operação para os conversores elétricos de potência, com a presença deste efeito(NADAI NASCIMENTO, 2019). De forma sucinta, o controle secundário considera a alteração dos coeficientes lineares das equações abaixo, isto é, o deslocamento vertical da reta pela alteração dos valores de referência.



$$\omega = \omega_{Ref} - m_k P_{gk}; \quad \mathbf{V}_k = V_{kRef} - n_k Q_{gk} \quad (1)$$

Na Equação (1),  $m$  e  $n$  são os coeficientes de *droop*, que são responsáveis por manter o sincronismo do sistema;  $P$  e  $Q$  são valores de variações de potência ativa e reativa,  $\omega$  e  $V$  são as variações de tensão terminal da barra  $k$  e frequência do sistema. O indicativo "ref" indica o valor de referência inicial, definido geralmente como os valores padrões de tensão e frequência do sistema principal. Por fim, o perfil do *droop* nos geradores antes e após a atuação do controle secundário pode ser visualizado pela Figura 1.

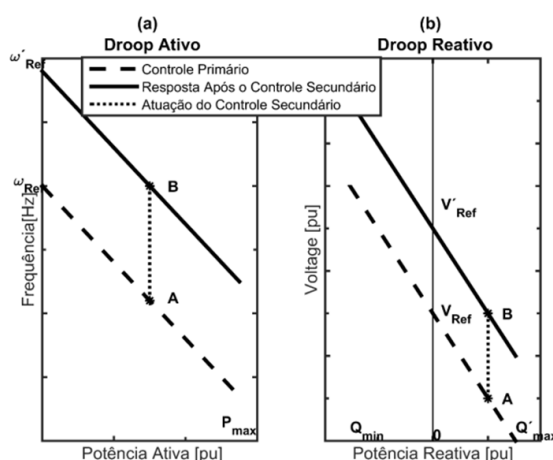


Figura 1 – Resposta do *droop* dos conversores. (a) *droop* ativo (b) *droop* reativo  
Fonte: (NADAI NASCIMENTO, 2019)

Haja visto, as mudanças que o *droop* trás para o fluxo de potência o qual mantém os perfis de potência para quaisquer níveis de carga alterando apenas valores referenciais de frequência e tensão, o *droop* também altera o conjunto de equações referentes ao sistema. Assim, o algoritmo implementando tende a ser versátil, garantindo uma análise da performance para qualquer condição de carga ou clima, representada pela apresentação de geração distribuída. A formulação básica do fluxo de potência característico do controle primário é definida através da seguinte equação,(2). (NADAI NASCIMENTO, 2019)

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}) = 0; \mathbf{x} = \begin{bmatrix} \delta \\ \mathbf{V} \\ V_1 \\ \omega \end{bmatrix}; \mathbf{f} = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta P_{sys} \\ \Delta Q_{sys} \end{bmatrix}; \text{onde: } [\mathbf{J}] = \begin{bmatrix} \left[ \frac{dP}{d\theta} \right] & \left[ \frac{dP}{dV} \right] & \frac{dP}{dV_1} & \frac{dP}{d\omega} \\ \left[ \frac{dQ}{d\theta} \right] & \left[ \frac{dQ}{dV} \right] & \frac{dQ}{dV_1} & \frac{dQ}{d\omega} \\ \frac{dQ_{sys}}{d\theta} & \frac{dQ_{sys}}{dV} & \frac{dQ_{sys}}{dV_1} & \frac{dQ_{sys}}{d\omega} \\ \frac{dP_{sys}}{d\theta} & \frac{dP_{sys}}{dV} & \frac{dP_{sys}}{dV_1} & \frac{dP_{sys}}{d\omega} \end{bmatrix} \quad (2)$$

O diferencial deste sistema do modelo de Newton Rapson frente ao algoritmo clássico são as variáveis de estado para a resolução dos *mismatches* do problema  $\mathbf{f}$ . As quais levam em consideração o efeito *droop* para determinar o  $\delta$  (os ângulos de todas as barras do sistema com relação à barra de referência), o  $\mathbf{V}$  ( as tensões das barras menos a de referência, o  $V_1$ , remete à tensão da barra de referência angular) e o  $\omega$ , que é a frequência angular. Nas equações de *mismatches*, os  $\Delta P$  e  $\Delta Q$  remetem aos de potências ativa e reativa de todas as barras e por fim  $\Delta P_{sys}$  e  $\Delta Q_{sys}$ , são os *mismatches* do sistema.



A proposta do controle secundário é muito semelhante, contudo com alterações na coluna na qual comporta às derivadas parciais de  $\mathbf{f}$  com relação à  $\omega_{Ref}$ . Basicamente, quando as variáveis violam o limite, estas passam a ser definidas e os valores de referência se tornam novas variáveis de estado, tal como dado na expressão (3).

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}) = 0; \mathbf{x} = \begin{bmatrix} \delta \\ \mathbf{V} \\ V_1 \\ \omega_{Ref} \\ \mathbf{V}_{Ref} \end{bmatrix}; \text{onde : } [\mathbf{J}_{\text{secundrio}}] = \begin{bmatrix} \left[ \frac{d\mathbf{P}}{d\Theta} \right] & \left[ \frac{d\mathbf{P}}{dV} \right] & \frac{d\mathbf{P}}{dV_1} & \frac{d\mathbf{P}}{d\omega_{Ref}} \\ \left[ \frac{d\mathbf{Q}}{d\Theta} \right] & \left[ \frac{d\mathbf{Q}}{dV} \right] & \frac{d\mathbf{Q}}{dV_1} & \frac{d\mathbf{Q}}{d\omega_{Ref}} \\ \frac{dQ_{sys}}{d\Theta} & \frac{dQ_{sys}}{dV} & \frac{dQ_{sys}}{dV_1} & \frac{dQ_{sys}}{d\omega_{Ref}} \\ \frac{dP_{sys}}{d\Theta} & \frac{dP_{sys}}{dV} & \frac{dP_{sys}}{dV_1} & \frac{dP_{sys}}{d\omega_{Ref}} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Nesta formulação, as alterações remetem aos valores de referência de frequência e de tensão para cada conversor contribuinte ao controle secundário do sistema e a definição para o novo modelo. Assim, as equações diferenciais da frequência de referência são definidas, através das relações dadas na expressão (4).

$$\frac{d\mathbf{P}}{d\omega_{Ref}} = 0; \frac{d\mathbf{Q}}{d\omega_{Ref}} = 0; \frac{dQ_{sys}}{d\omega_{Ref}} = 0; \frac{dP_{sys}}{d\omega_{Ref}} = \sum_{i=1}^{n_g} \frac{1}{m_i} \quad (4)$$

Já para a determinação da tensão de referência ( $\mathbf{V}_{Ref}$ ), é utilizada para a resolução, um sistema resolvido de maneira separada à Jacobiana na qual foi definida em (3). Onde uma análise de sensibilidade é estabelecida para o controle secundário. Proporcionando assim uma atuação local dos controladores dos geradores do sistema, uma vez que o acoplamento Q/V garante a correção da tensão localmente, tal como descrito na seguinte formulação (5).

$$\mathbf{f}_Q(V_{viol}, \mathbf{V}_{Ref}) = 0; \text{sendo : } V_{viol} = V_{lim} - \Delta V_{viol} \quad (5)$$

A partir desta formulação, tem-se que  $\Delta V_{viol}$  é definido como sendo o incremento de tensão necessária para que o controle secundário alcance o menor valor de tensão limite ( $V_{lim}$ ) na barra que atingiu a menor tensão que esteja fora dos limites. Vale destacar que estas funções determinam uma análise realizada apenas nas equações do fluxo de potência relativas à potência reativa, pois é esta a maior influência na variação da tensão, tendo em vista a baixa razão X/R de sistemas de distribuição e consequentemente o acoplamento Q/V.

Desta forma, o novo ponto de operação do sistema é definido a partir da derivada da equação (5), e assim têm-se os novos valores de referência ao sistema, provenientes da atuação do controle secundário e obtidos via resolução direta do fluxo de potência.

$$\mathbf{V}_{Ref}^{t+1} = \mathbf{V}_{Ref}^t + \Delta \mathbf{V}_{Ref}^t; \omega_{Ref}^{t+1} = \omega_{Ref}^t + \Delta \omega_{Ref}^t \quad (6)$$

Estes valores são alterados de acordo com as iterações durante o fluxo de potência e de maneira contínua para um perfil definido de geração renovável e carga, o que garante uma análise constante de violação. Este processo do controle secundário atua de maneira paralela ao controle primário do sistema como ilustrado no fluxograma (Figura (2)) da próxima sessão .



## RESULTADOS E DISCUSSÕES

O algoritmo desenvolvido durante este trabalho, pode ser descrito de maneira mais simplificada através do fluxograma apresentado na figura (2). Nele, a base do fluxo de potência convencional prevalece até o algoritmo convergir. Caso necessário, os valores de referência são alterados, o que caracteriza o controle secundário quando as variáveis de tensão e frequência são violadas, sendo estas então definidas nos limites impostos pelo Módulo 8 do PRODIST. A partir disso o processo de iterações é iniciado novamente. Após a convergência, há uma verificação de violação de capacidade das unidades geradoras.

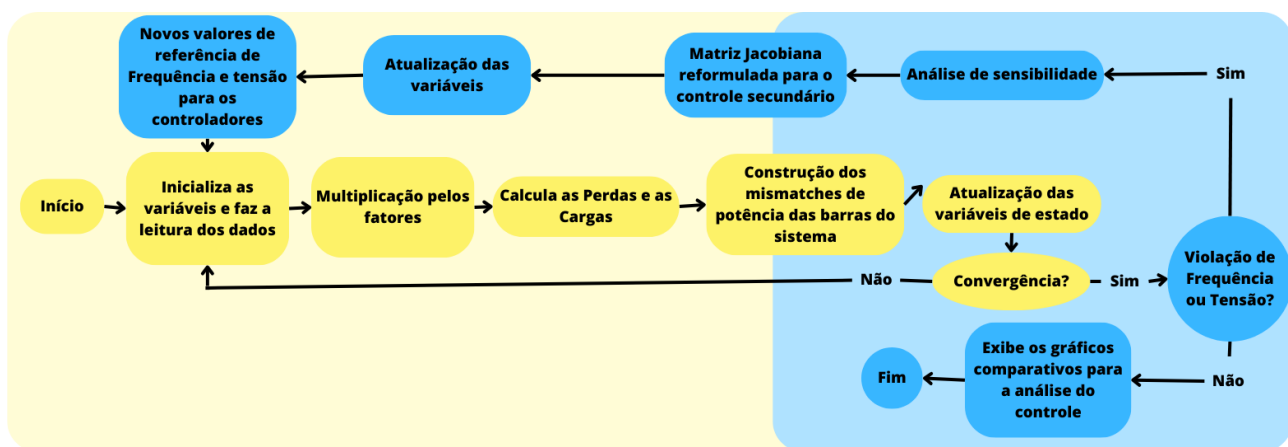


Figura 2 – Fluxograma que exemplifica o algoritmo

Fonte: Do autor

Para o sistema estudado são definidos os limites são: limite inferior de tensão de 0,95 p.u., e superior de 1,05 p.u. e os limites de frequência aplicados ao sistema foram de 0,9917 p.u. e de 1,001, prevendo que o algoritmo possui uma baixa sensibilidade à variações do sistema.

Um dos resultados obtidos através do algoritmo é ilustrado na Figura 2, onde é possível a visualização da atuação do controle secundário para um perfil de carga residencial de um sistema. Nota-se que, em função da variação de carga das amostras, a frequência e a tensão do sistema oscilam e podem alcançar valores fora dos limites, necessitando assim da atuação do controle secundário. O controle secundário aqui estudado garante, portanto, que os níveis de tensão e frequência fiquem no limite após a sua atuação.

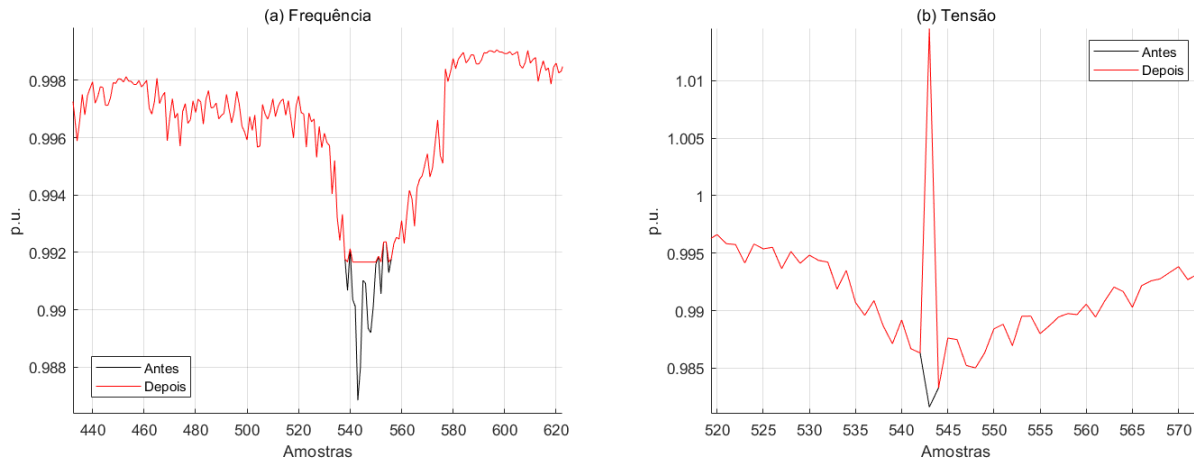


Figura 3 – Atuação do controle secundário: (a) Frequência e (b) Tensão

Fonte: Do autor

Por meio do resultado obtido é possível a percepção do ajuste do valor de tensão, a qual acontece devido ao ajuste da frequência, visto que não há violação de limite de tensão, o que é ilustrado em (b) da Figura (3) uma mudança neste ocorre pelo controle secundário da frequência para o sistema, quando este atua para a regulação da mesma.

## AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento (CNPq), pelo suporte financeiro e à Universidade Tecnológica Federal do Paraná(UTFPR), pela estrutura oferecida.

## CONFLITO DE INTERESSE

Não há conflito de interesse.

## REFERÊNCIAS

- HATZIARGYRIOU, Nikos. The Microgrids Concept. In: MICROGRIDS: Architectures and Control. [S.l.: s.n.], 2014. P. 1–24. DOI: [10.1002/9781118720677.ch01](https://doi.org/10.1002/9781118720677.ch01).
- MORAES, Fabricio P et al. Caracterização e Aplicações de Microrredes de Missão Crítica. **Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos-SBSE**, v. 2, n. 1, 2022.
- MUMTAZ, Faisal et al. A Novel Approach to Solve Power Flow for Islanded Microgrids Using Modified Newton Raphson With Droop Control of DG. **IEEE Transactions on Sustainable Energy**, v. 7, n. 2, p. 493–503, 2016. DOI: [10.1109/TSTE.2015.2502482](https://doi.org/10.1109/TSTE.2015.2502482).
- NADAI NASCIMENTO, Bruno de. **Controle secundário aliado ao corte de carga para microrredes em condições operativas de ilhamento**. 2019. Tese (Doutorado) – Universidade federal de Itajubá.
- PAIVA, SÂMARA CAVALCANTE et al. Ilhamento em um Sistema Elétrico de Potência com Geração Distribuída. In: 1. CONGRESSO Brasileiro de Automática-CBA. [S.l.: s.n.], 2019. v. 1.

**XIII Seminário de Extensão e Inovação  
XXVIII Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da UTFPR**

Ciência e Tecnologia na era da Inteligência Artificial: Desdobramentos no Ensino Pesquisa e Extensão  
20 a 23 de novembro de 2023 - *Campus Ponta Grossa, PR*



**SEI-SICITE**  
2023



SOARES, Renan Moreira; OLIVEIRA, Marcelo Escobar. Microrredes: o conceito através da história, incentivos e o mercado brasileiro. **Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos**, Universidade Federal de Santa Maria, 2022.