



# Análise de métodos de fluxo de potência para microrredes ilhadas com operação baseada em curvas de *droop* utilizando MATLAB e OpenDSS.

*Analysis of power flow methods for islanded microgrids with droop based operation using MATLAB and OpenDSS.*

Gustavo Pianovski da Silva \*, Renan Silva Maciel†

## RESUMO

Para o controle de frequência e tensão em microrredes ilhadas são utilizadas técnicas como as curvas de *droop*, sendo preciso adaptar os métodos de resolução de fluxo de potência para receber tais características. Assim, este artigo tem como objetivos de analisar métodos de fluxo de potência de varredura para microrredes ilhadas operadas por *droop*, além de realizar a implementação de algoritmo capaz de realizar a simulação isolada utilizando o *software* OpenDSS. Para isso, foram adaptados métodos de fluxo de potência apresentados na literatura, com a incorporação de fatores de desaceleração, a fim de melhorar a convergência. Para a simulação de microrredes utilizando o OpenDSS, utilizou-se a interface COM para a integração com o *software* MATLAB. Foram realizados testes utilizando as microrredes de 33 e 38 barras. Para ambas as redes, obtiveram-se resultados satisfatório comparados aos valores de simulação do PSCAD obtidos na literatura. Para a microrrede de 38 barras, os fatores de desaceleração influenciam diretamente na convergência da simulação. Assim, a análise e o aprimoramento do método utilizado e a integração com OpenDSS via interface COM foram satisfatórios, auxiliando a simulação de microrredes ilhadas operadas por *droop* utilizando o *software*.

**Palavras-chave:** microrredes, fluxo de potência, curvas de *droop*, OpenDSS, geração distribuída.

## ABSTRACT

For frequency and voltage control in island microgrids, techniques such as droop curves are used, and it is necessary to adapt the power flow methods to deal with such characteristics. Thus, this article aims to analyze power flow methods for droop operated islanded microgrids. Additionally, a power flow algorithm was implemented to perform simulations in islanded microgrids using OpenDSS software. Power flow methods found in literature were adapted, with the incorporation of deceleration factors, in order to improve convergence. For the simulation of microgrids using OpenDSS, the COM interface was used for integration with MATLAB software. Tests were performed out using the 33 and 38 bus microgrids. and satisfactory results were obtained compared to the PSCAD simulation found in the literature. For the 38-bus microgrid, the deceleration factors directly influence the convergence of the simulation. In view of this, this work proposes an improvement in a scanning method and a technique to use OpenDSS to calculate power flow in islands. Thus, the analysis and improvement of the method used and an integration with OpenDSS via COM interface were satisfactory, aiding a simulation of islanded microgrids operated by droop using the software.

**Keywords:** microgrids, power flow, droop curves, OpenDSS, distributed generation.

\* Curso de Engenharia Elétrica, UTFPR - campus Apucarana; [gustavosilva.1998@alunos.utfpr.edu.br](mailto:gustavosilva.1998@alunos.utfpr.edu.br).

† Coordenação de Engenharia Elétrica, UTFPR - campus Apucarana; [renansmaciel@utfpr.edu.br](mailto:renansmaciel@utfpr.edu.br).



## 1 INTRODUÇÃO

O conceito de microrredes (MR) compreende a coordenação de Recursos Energéticos Distribuídos (REDs), geração, armazenamento e controle de cargas, com a finalidade de controlar a tensão, frequência do sistema ilhado e o despacho dos Geradores Distribuídos (GD), operando no modo conectado ou isolado da rede principal (CAÑIZARES et al., 2014). Quando a MR opera ilhada, é necessário incorporar as variáveis de controle na resolução de fluxo de potência. Desse modo, este artigo apresenta uma análise de métodos de fluxo de potência de varredura para MR ilhadas com operação baseada em curvas de *droop*, implementadas utilizando inicialmente o *software* MATLAB, e posteriormente, o OpenDSS através da interface COM, devido a sua ampla capacidade de modelagem e simulação. Além disso, o OpenDSS originalmente não possui funcionalidades para calcular fluxo de potência em MR ilhadas operadas por *droop*.

O planejamento da operação, para obter o equilíbrio entre carga e geração, e a análise em regime permanente da MR operando de forma isolada são alguns dos desafios técnicos da operação ilhada. Para o último caso, os métodos tradicionais para a resolução do problema de fluxo de potência não representam adequadamente a operação no modo estatismo, sendo necessário adaptá-los para que possam ser consideradas as características das curvas de *droop*. Em vista disso, propostas baseadas nos métodos de varredura foram apresentadas em Diaz, Gomez-Aleixandre e Coto (2016), Hameed, Al Hosani e Zeineldin (2019) e Kumar et al. (2019). Métodos adaptados de Newton-Raphson também foram propostos na literatura, como o apresentado por Mumtaz et al. (2016). Baseado na literatura apresentada, como implementa-se algoritmos de fluxo de potência em MR ilhadas operadas por *droop*, e ainda, que beneficie-se de *software* com ampla capacidade de modelagem e simulação de rede de distribuição, como o OpenDSS?

Nesse sentido, o objetivo desta pesquisa é analisar e implementar método de fluxo de potência em MR ilhadas operando com as características imposta pelas curvas de *droop* e propor uma maneira de simulação ilhada no *software* OpenDSS, visto que, ainda não há funcionalidades dessa natureza incorporadas no programa. Como objetivos específicos, deseja-se compreender os métodos de resolução de fluxo de potência utilizados atualmente para MR ilhadas com operação baseada em curva de *droop*, implementar um programa computacional com um algoritmo para resolução do problema de fluxo de potência com inclusão das características das curvas de *droop*, comparar resultados obtidos no programa computacional com outros trabalhos encontrados na literatura e propor estudos a implementação da microrrede operada por *droop* no *software* OpenDSS.

## 2 MÉTODO

O procedimento adotado nesta pesquisa, trata-se inicialmente da revisão da literatura buscando artigos sobre fluxo de potência em microrredes ilhadas. A partir de então, definiu-se a implementação do algoritmo *Modified Backward/Forward Sweep* (MBFS) proposto por Hameed, Al Hosani e Zeineldin (2019), por entender que o método poderia ser integrado ao *software* OpenDSS. Posteriormente, devido aos problemas de convergência do método implementado, elaborou-se uma proposta de melhoria através dos fatores de desaceleração  $\gamma$  e  $\lambda$ . Segundo Kumar et al. (2019), o método MBFS apresenta instabilidade em algumas variáveis durante o processo iterativo, o que pode vir a se tornar problema na convergência, além da não convergência em algumas topologias de MR, entre elas, a de 38 barras. Com a proposta de utilizar os fatores, alcançou-se uma melhoria na convergência. Por fim, realizou-se a implementação do método MBFS adaptado usando o OpenDSS, por meio da interface COM e MATLAB. Em seguida, será tratado do equacionamento realizado para a implementação do



método proposto, juntamente com as melhorias proposta, além da metodologia utilizada para a integração com o OpenDSS e as microrredes utilizadas para as simulações.

A forma de operação dos geradores ocorre no modo estatismo, baseado nas chamadas curvas de *droop*, adequado para sistemas com múltiplos geradores operando juntos para a manutenção de frequência e tensão, como é o caso das MR. As Eq. (1), demonstram o modelo dos geradores distribuídos com operação baseado nas curvas de *droop*.

$$w = w_o + m_p(P_G - P_{G_o}) \quad e \quad |V| = |V_o| + n_q(Q_G - Q_{G_o}) \quad (1)$$

Sendo  $P_G$  e  $Q_G$  as potências ativa e reativa gerada pelo gerador, respectivamente, e  $P_{G_o}$  e  $Q_{G_o}$  as potências nominais do gerador.

Antes de iniciar o processo de varredura, deve-se criar uma Barra Virtual (BV) conectada em qualquer barra da MR, servindo como o ponto de chegada e partida da varredura.

Iniciando o processo iterativo, atualiza-se a potência dos GD conforme demonstram as Eq. (2).

$$P_{G_i}^{k+1} = (1 - \lambda) \cdot P_{G_i}^k + \lambda \cdot \left( P_{G_{io}} + \frac{\Delta f}{m_{pi}} \right) \quad e \quad Q_{G_i}^{k+1} = (1 - \lambda) \cdot Q_{G_i}^k + \lambda \cdot \left( Q_{G_{io}} + \frac{|V_i| - |V_o|}{n_{qi}} \right) \quad (2)$$

A varredura a montante é calculada pela soma das correntes da barra mais distante até a BV, através da formulação matemática proposta por Teng (2003), em que o autor propôs a utilização da matriz de injeção de corrente de barra para corrente de ramo BIBC (*Bus-Injection to Branch-Current*), obtida através da matriz incidência dos nós (KUMAR et al., 2019). Desse modo, calcula-se a correntes dos ramos através da Eq. (3).

$$[I_{ij}] = [BIBC] \cdot [I_j], \quad I_j = \left( \frac{(P_{L_j} + jQ_{L_j}) - (P_{G_j} + jQ_{G_j})}{V_j} \right)^* \quad (3)$$

A etapa de varredura a jusante consiste em calcular a nova tensão nas barras, baseada nas correntes dos ramos encontradas na varredura a montante. Para isso, Teng (2003) propôs a matriz de corrente de ramo para tensão das barras BCBV (*Branch-Current to Bus-Voltage*), obtida através da inversa da matriz incidência dos nós multiplicada pela matriz diagonal de impedância. Desse modo, obtém-se a matriz de tensão das barras ( $V_j$ ) conforme a Eq. (4).

$$[V_j] = V_{BV} - [BCBV] \cdot [I_{ij}] \quad (4)$$

Por fim, após a convergência do fluxo de potência atualiza-se a frequência da MR e a tensão da BV, por meio das Eq. (5) e Eq. (6), respectivamente.

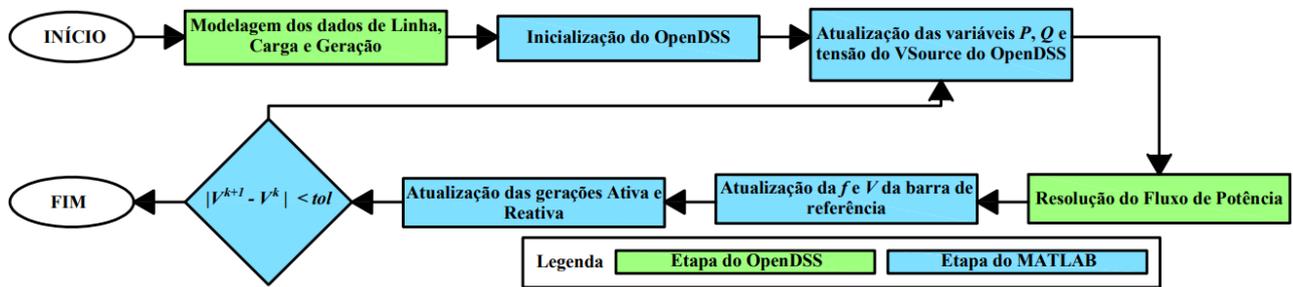
$$\Delta f = m_{peq} \cdot [P_{GBV} - \Re(V_{BV} \cdot I_{j,BV})] \quad e \quad f^{k+1} = f_0 + \Delta f \quad (5)$$

$$\Delta V_{BV} = n_{qeq} \cdot [Q_{GBV} - \Im(V_{BV} \cdot I_{j,BV})] \quad e \quad V_{BV}^{k+1} = V_{BV_0} + \gamma \cdot \Delta V_{BV} \quad (6)$$

$$\text{Em que } m_{peq} = \frac{1}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{GD \cdot m_{pi}}} \text{ e } n_{qeq} = \frac{1}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{GD \cdot n_{qi}}}.$$

Implementa-se as equações apresentadas no *software* MATLAB para a resolução do fluxo de potência em MR ilhadas. Já na simulação utilizando o OpenDSS com o MATLAB via interface COM, as Eq. (3) e Eq. (4), referente ao processo de varredura, não são implementadas, pois utilizam o método de fluxo de potência próprio do *software*. A Fig. 1 ilustra o fluxograma do algoritmo proposto utilizando utilizando o OpenDSS.

Figura 1 – Fluxograma do algoritmo de fluxo de potência utilizando OpenDSS



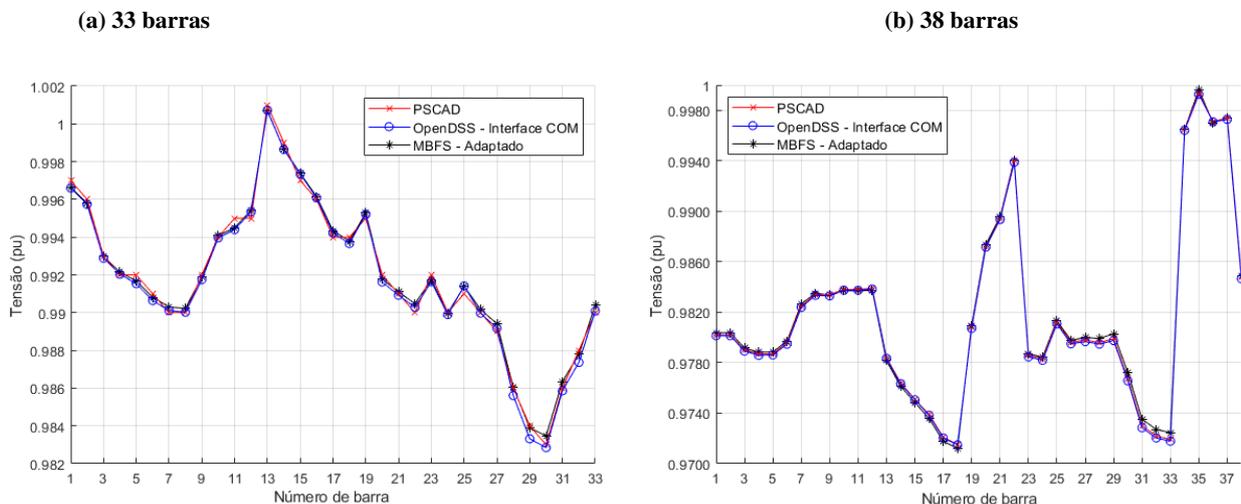
Fonte – Autoria Própria

Para a validação dos resultados, utilizou-se MR de teste de 33 barras proposta por Diaz, Gomez-Alexandre e Coto (2016) e posteriormente simulada por Hameed, Al Hosani e Zeineldin (2019) e Kumar et al. (2019), e a de 38 barras proposta por Mumtaz et al. (2016). Em ambos os casos, validou-se os resultados com os obtidos pelo autores. Os coeficientes de *droop* utilizados são encontrados em Hameed, Al Hosani e Zeineldin (2019) (Teste 1) e Mumtaz et al. (2016), para as MR de 33 e 38 barras, respectivamente.

### 3 RESULTADOS

Com a proposta de simulação das MR de 33 e 38 barras, obtêm-se os perfis de tensão dos dois sistemas, apresentados na Fig. 2. Para cada uma das redes, a figura mostra três resultados de tensão: PSCAD, obtidos da literatura; MBFS adaptado, que se trata da implementação do método proposto em Hameed, Al Hosani e Zeineldin (2019), com proposta de melhoria formulada neste projeto de pesquisa; e OpenDSS - interface COM, em que se realiza a simulação utilizando o *software* OpenDSS juntamente com o MATLAB. No Quadro 1, encontram-se os erros de magnitude da tensão, de potência aparente da GD e da frequência da MR, comparados com o valor obtido pelo PSCAD (KUMAR et al., 2019; MUMTAZ et al., 2016).

Figura 2 – Perfil de tensão para as MR de 33 e 38 barras



Fonte – Autoria Própria

**Quadro 1 – Erros para as MR de 33 e 38 barras**

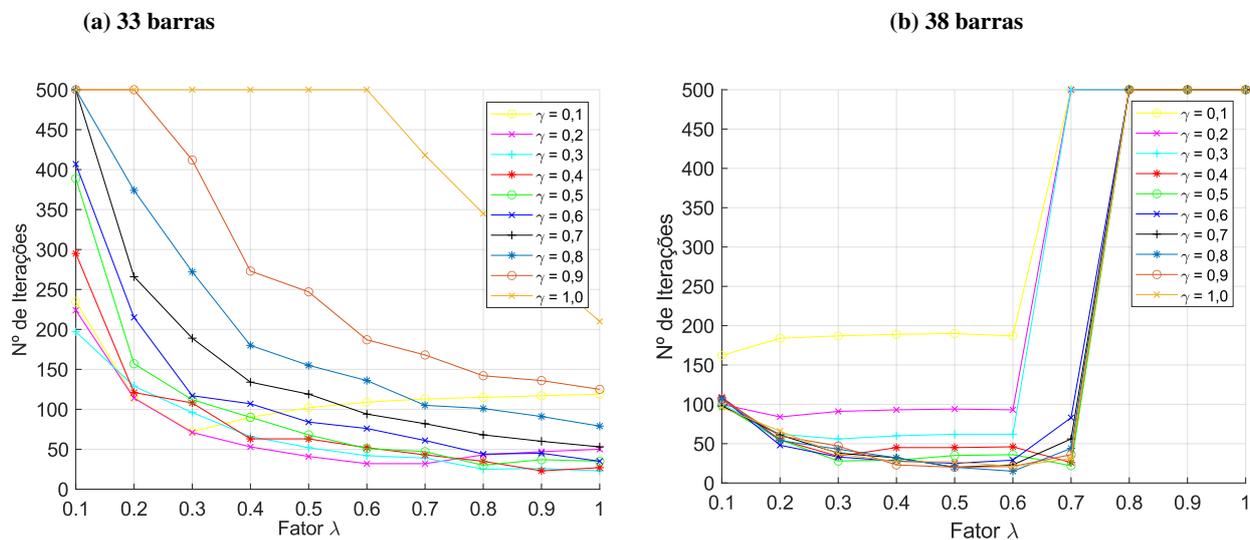
Microrrede de 33 barras							
	Nº de Iteração	Max. erro abs. $V_i$	Max. erro de $V_i$ (%)	Max. erro abs. $S_G$	Max. erro de $S_G$ (%)	Erro abs. de $f$	Erro de $f$ (%)
MBFS - Adaptado	52	$5,03 \cdot 10^{-4}$	0,050	$4,24 \cdot 10^{-4}$	0,016	$1,21 \cdot 10^{-4}$	0,01
OpenDSS - Interface COM	52	$6,84 \cdot 10^{-4}$	0,069	0,0016	0,099	$1,21 \cdot 10^{-4}$	0,01
Microrrede de 38 barras							
MBFS - Adaptado	61	$5,59 \cdot 10^{-4}$	0,057	0,0074	0,57	$2,50 \cdot 10^{-6}$	$2,50 \cdot 10^{-4}$
OpenDSS - Interface COM	63	$1,69 \cdot 10^{-4}$	0,017	0,0039	0,30	$5,90 \cdot 10^{-6}$	$5,91 \cdot 10^{-4}$

Fonte – Autoria Própria

Analisando-se os resultados do Quadro 1 e da Fig. 2, pode-se observar que a implementação do algoritmo para resolução do fluxo de potência foi satisfatório, visto que os valores obtidos são próximos aos encontrados na literatura. Do mesmo modo, a implementação utilizando o OpenDSS também atingiu o resultados esperados.

Por fim, a Fig. 3 ilustra a influência da variação dos fatores de desaceleração, implementados nas Eq. (2) e Eq. (6), no número de iterações do processo. Observa-se que, para o sistema de 33 barras o algoritmo converge quando não há influência dos fatores ( $\lambda = \gamma = 1$ ), o que não ocorre na MR de 38 barras. Entretanto, com a proposta de incorporar esses fatores no método, a rede de 38 barras passa a convergir. Além disso, nos casos em que o número de iterações é 500, demonstra-se que o algoritmo não convergiu naquela situação.

**Figura 3 – Comparação de desempenho do método com relação aos fatores de desaceleração para as MR de 33 e 38 barras**



Fonte – Autoria Própria

Na Fig.3 (a) constata-se que, o aumento de  $\lambda$  melhora a convergência para todos os  $\gamma$ , e, com o aumento do fator  $\gamma$  o números de iterações também cresce. Já na Fig.3 (b), observa-se que o fator  $\lambda$  afeta de forma importante o desempenho do método, pois não há convergência para todos os valores de  $\gamma$  a partir de  $\lambda = 0,8$ .



## 4 CONCLUSÕES

Este artigo apresentou implementações de algoritmo de fluxo de potência em MR ilhadas com geradores controlados por *droop*. Conclui-se que a proposta de melhoria incorporada ao método MBFS atingiu os resultados esperados fazendo com que o método passasse a convergir para a MR de 38 barras, o que não ocorria aplicando-se a formulação original. Adicionalmente, com a proposta de utilização de *software* amplamente utilizado em sistema de distribuição de energia, esta pesquisa colabora com o a difusão da análise de sistemas ilhados, visto que o OpenDSS possui ampla capacidade de modelagem dos elementos que compõem uma microrrede.

Como trabalhos futuros, pretende-se aprofundar nos estudos da convergência desses métodos para compreender, em outras microrredes, a influência desses fatores, bem como propor técnicas para a definição dos fatores de desaceleração.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CNPq pelo suporte financeiro desta pesquisa através da bolsa de Iniciação Científica concedida ao acadêmico Gustavo Pianovski da Silva e à Universidade Tecnológica Federal do Paraná pelos recursos disponibilizados para realizar esta pesquisa.

## REFERÊNCIAS

- CAÑIZARES, Claudio A et al. Trends in Microgrid Control. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 5, n. 4, p. 1905–1919, 2014.
- DIAZ, Guzman; GOMEZ-ALEIXANDRE, Javier; COTO, Jose. Direct Backward/Forward Sweep Algorithm for Solving Load Power Flows in AC Droop-Regulated Microgrids. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 7, n. 5, p. 2208–2217, 2016.
- HAMEED, Faisal; AL HOSANI, Mohamed; ZEINELDIN, H. H. A Modified Backward/Forward Sweep Load Flow Method for Islanded Radial Microgrids. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 10, n. 1, p. 910–918, 2019.
- KUMAR, Abhishek et al. Nested backward/forward sweep algorithm for power flow analysis of droop regulated islanded microgrids. **IET Generation, Transmission and Distribution**, v. 13, n. 14, p. 3086–3095, 2019.
- 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.
- TENG, Jen Hao. A direct approach for distribution system load flow solutions. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 18, n. 3, p. 882–887, 2003.