

## Alocação Ótima de Geradores Distribuídos em Microrredes Ilhadas Considerando Controle *Droop* de Frequência

Fabício C. Gonçalves\*. Wesley Peres\*. Fernando A. Assis\*. Francisco C. R. Coelho\*. Bruna C. Ferreira\*. Raphael P. B. Poubel\*\*

\*Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de São João del Rei – UFSJ, São João del-Rei, Minas Gerais, Brasil (e-mail: [fabricao.carlos82@yahoo.com.br](mailto:fabricao.carlos82@yahoo.com.br); [wesley.peres@ufsj.edu.br](mailto:wesley.peres@ufsj.edu.br); [fernandoassis@ufsj.edu.br](mailto:fernandoassis@ufsj.edu.br); [franciscocoelho@ufsj.edu.br](mailto:franciscocoelho@ufsj.edu.br); [bruna.cfpta@hotmail.com](mailto:bruna.cfpta@hotmail.com))

\*\* Departamento de Engenharia Elétrica, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG, Belo Horizonte, Brasil (e-mail: [poubel@cefetmg.br](mailto:poubel@cefetmg.br))

---

Abstract: This paper solves the optimal distributed generation allocation problem in islanded microgrids for active power loss minimization. A binary Genetic Algorithm is employed in which each individual is evaluated by an Optimal Power Flow (OPF). The OPF considers limits of nodal voltages, power generations, and frequency, taking into account the droop characteristic of distributed generators connected to the grid through Voltage Source Inverters. The methodology is evaluated using a 33-bus islanded microgrid, and the results are compared with the ones provided by an exhaustive search.

Resumo: Esse artigo soluciona o problema de alocação ótima de geradores distribuídos em microrredes ilhadas para minimização de perdas de potência ativa. Um Algoritmo Genético binário é empregado no qual cada indivíduo é avaliado por um Fluxo de Potência Ótimo (FPO). O FPO considera os limites de tensões nodais, gerações de potência e frequência, bem como o efeito de *droop* dos geradores distribuídos conectados à rede através de Inversores Fonte de Tensão (*Voltage Source Inverters*). A metodologia é avaliada em uma microrrede ilhada de 33 barras e os resultados são comparados com aqueles fornecidos por uma busca exaustiva.

**Keywords:** Microgrids; Islanded Operation; Distributed Generation; Optimal Placement; Losses Minimization.

**Palavras-chaves:** Microrredes; Operação Ilhada; Geração Distribuída; Alocação Ótima; Minimização de Perdas.

---

### 1. INTRODUÇÃO

A conexão de unidades de geração distribuída às redes de distribuição tornou-se uma solução atrativa para melhoria da qualidade e confiabilidade do suprimento de energia (Lopes et al., 2006). Mais recentemente, a integração de geração dispersa aos sistemas de distribuição de forma não coordenada evoluiu para um conceito mais complexo denominado de microrrede (El-hawary, 2014; Lasseter, 2002).

Uma microrrede é geralmente composta por um conjunto de alimentadores radiais no qual fontes de microgeração e cargas controladas são conectadas. A microrrede é então conectada a um sistema de grande porte (rede principal) através do Ponto de Conexão Comum (*Point of Common Coupling* – PCC) (Lasseter, 2002). A principal característica de uma microrrede é a possibilidade de operação em modo ilhado, isto é, desconectado da rede principal.

No modo ilhado, as cargas da microrrede são supridas por gerações locais (geradores síncronos, painéis fotovoltaicos,

geradores eólicos, etc). Uma característica importante da microrrede é que as unidades de microgeração são conectadas à rede através dos Inversores Fonte de Tensão (*Voltage Source Inverters* – VSI), capazes de prover flexibilidade para a operação da microrrede em modo ilhado ou conectado à rede principal (Milano, 2010).

Na operação ilhada, os conversores VSI emulam o comportamento de *droop* de frequência adotado no controle primário de frequência de geradores síncronos: diante de uma variação de carga, todas as unidades de geração ajustam suas potências terminais de forma a suprir a nova demanda. Considerando a característica de *droop*, a frequência no novo ponto de operação pode diferir do valor nominal (50 Hz ou 60 Hz).

Uma microrrede pode operar ilhada em duas situações: (i) quando ocorre um distúrbio e esta é desconectada da rede principal (logo ocorrerá a reconexão após o tempo de reparo); e (ii) quando esta foi projetada para operar de forma isolada permanentemente. Em ambas as situações é importante

garantir uma operação viável (respeitando limites de frequência e de tensão) e econômica (com mínimo custo e mínimas perdas de potência) (Foroutan et al., 2016; Hemmatpour et al., 2016).

Um dos fatores que impactam diretamente na operação viável e econômica das microrredes é o posicionamento das unidades de geração distribuída. O problema de alocação e dimensionamento de unidades de geração distribuída (microgeração) em sistemas de distribuição (que são sistemas conectados à rede principal) é bem estabelecido na literatura (Coelho et al., 2020; Dias et al., 2012; Georgilakis & Hatziaargyriou, 2013; Zhang et al., 2019).

Mais recentemente têm sido publicados trabalhos na literatura com foco na alocação de geradores distribuídos em microrredes ilhadas. Em (Gupta et al., 2021, 2020) uma metodologia baseada em índices de sensibilidade e fluxo de potência ótimo foi proposta para alocação de geradores distribuídos e reconfiguração para a minimização de perdas de potência ativa. O efeito de *droop* de frequência foi considerado bem como os respectivos limites de tensão e frequência.

O problema de alocação de microgerações em microrredes ilhadas é de natureza não-linear inteira mista em que:

- i. as posições de alocação assumem valores inteiros: 1 (barra com geração) ou 0 (barra sem geração);
- ii. as seguintes grandezas são de natureza contínua: gerações de potência ativa e reativa, tensões nodais, frequência da microrrede e parâmetros da curva de *droop*.

Para a solução do problema de alocação e dimensionamento é comum a utilização de metaheurísticas. As metaheurísticas são métodos populacionais de otimização em que os indivíduos da população interagem entre si na busca de soluções de boa qualidade (Goldberg, 1989; Yang, 2014). Ressalta-se que: (i) existem metaheurísticas não populacionais (fora do escopo deste trabalho) e (ii) a forma na qual os indivíduos interagem entre si dá origem à diversas metaheurísticas.

Com base na revisão bibliográfica apresentada, identifica-se que a alocação de geração distribuída em microrredes ilhadas utilizando-se metaheurísticas é um tema promissor. Assim sendo, o presente trabalho visa solucionar esse problema utilizando a metaheurística Algoritmo Genético (AG) e uma ferramenta de Fluxo de Potência Ótimo (FPO) para a minimização de perdas ativas. Escolheu-se o AG por este ser um método bastante difundido na literatura. Ressalta-se que o FPO utilizado considera o efeito de *droop* de frequência e tensão nas unidades de geração distribuídas (La Gatta et al., 2019). A metodologia proposta é avaliada em uma microrrede ilhada de 33 barras (Hemmatpour et al., 2016).

## 2. METODOLOGIA PROPOSTA

### 2.1 Característica de Droop

A Figura 1 apresenta as características de *droop*  $P - f$  e  $Q - V$  de um gerador conectado à rede através de um inversor do tipo VSI (*Voltage Source Inverter*). As gerações de potência

ativa e reativa ( $P_{gk}$  e  $Q_{gk}$ ) podem ser calculadas através das expressões matemáticas nas equações (1)-(2).

$$P_{gk} = \frac{1}{s_{pk}} \cdot (f_k^* - f_{MG}) \quad (1)$$

$$Q_{gk} = \frac{1}{s_{qk}} \cdot (V_k^* - V_k) \quad (2)$$

em que  $f_{MG}$  é a frequência da microrrede;  $V_k$  é a tensão terminal do gerador  $k$ ;  $f_k^*$  e  $V_k^*$  são as referências de  $f_{MG}$  e  $V_k$  (operação à vazio);  $s_{pk}$  e  $s_{qk}$  são os coeficientes de *droop* relacionados ao controle  $P - f$  e  $Q - V$ , respectivamente.

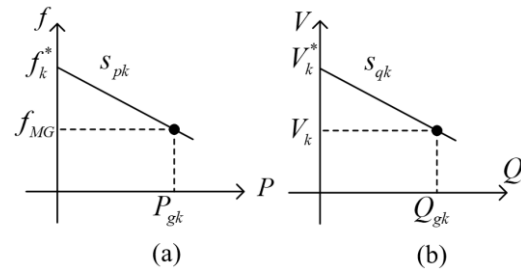


Fig. 1 Característica (a)  $P - f$  droop, (b)  $Q - V$  droop.

### 2.2 Fluxo de Potência Ótimo para Minimização de Perdas em Microrredes Ilhadas considerando o Controle em Droop

O modelo (3) apresenta a formulação geral de um FPO, sendo  $\underline{x}$  o vetor de variáveis de estado e controle,  $F(\underline{x})$  a função objetivo,  $\underline{h}(\underline{x})$  e  $\underline{g}(\underline{x})$  os conjuntos de restrições de igualdade e desigualdade,  $\underline{lb}$  e  $\underline{ub}$  os limites mínimo e máximo das variáveis.

$$\begin{aligned} & \text{minimizar} && F(\underline{x}) \\ & && \underline{h}(\underline{x}) = 0 \\ & \text{sujeito a} && \underline{g}(\underline{x}) \leq 0 \\ & && \underline{lb} \leq \underline{x} \leq \underline{ub} \end{aligned} \quad (3)$$

A função objetivo  $F(\underline{x})$  no modelo (3) é detalhada em (4), que é o somatório de perdas de potência ativa em todos os ramos ( $k, m$ ) do sistema.

$$\min F = \sum_{(k,m) \in \Omega_L} g_{km} \cdot (V_k^2 + V_m^2 - 2 \cdot V_k \cdot V_m \cdot \cos \theta_{km}) \quad (4)$$

em que:  $\Omega_L$  é o conjunto de ramos do sistema;  $g_{km}$  é a condutância do ramo;  $V_k$  e  $V_m$  são as magnitudes das tensões das barras terminais do ramo;  $\theta_{km}$  é a abertura angular.

O conjunto de restrições de igualdade  $\underline{h}(\underline{x})$  em (3) é composto por (5)-(10). O balanço de potência ativa e reativa na barra  $k$  é dado em (5)-(6):  $\Omega_B$  é o conjunto de barras do sistema;  $P_{dk}$  e  $Q_{dk}$  são as cargas ativa e reativa;  $P_k$  e  $Q_k$  são as injeções de potência ativa e reativa calculadas conforme (Gómez-Expósito et al., 2017). Nesse artigo não é considerada a dependência da carga com a tensão e frequência (Kundur, 1994). As características de *droop*  $P - f$  e  $Q - V$  são dadas por (7)-(8), sendo  $\Omega_G$  o conjunto de geradores.

A equação (9) garante a referência angular de uma das barras do sistema (qualquer uma delas): ressalta-se que nessa formulação não é considerada uma barra de balanço que supre todas as variações de carga do sistema (como é feito no fluxo de potência ótimo convencional). Por fim, em (10) expressa-se a potência aparente gerada  $S_{gk}$  como função das potências ativa e reativa geradas.

$$P_{gk} - P_{dk} - P_k = 0 \quad (k \in \Omega_B) \quad (5)$$

$$Q_{gk} - Q_{dk} - Q_k = 0 \quad (k \in \Omega_B) \quad (6)$$

$$P_{gk} - \frac{1}{s_{pk}} \cdot (f_k^* - f_{MG}) = 0 \quad (k \in \Omega_G) \quad (7)$$

$$Q_{gk} - \frac{1}{s_{qk}} \cdot (V_k^* - V_k) = 0 \quad (k \in \Omega_G) \quad (8)$$

$$\theta_k^{ref} = 0 \quad (9)$$

$$S_{gk} - \sqrt{(P_{gk})^2 + (Q_{gk})^2} = 0 \quad (k \in \Omega_G) \quad (10)$$

O conjunto de restrições de desigualdade  $\underline{g}(\mathbf{x})$  em (3) é composto por (11) e (12), em que  $S_{gk}^{max}$  é o limite de potência aparente do gerador  $k$ .

$$S_{gk} \leq S_{gk}^{max} \quad (k \in \Omega_G) \quad (11)$$

$$P_{gk} \geq 0 \quad (k \in \Omega_G) \quad (12)$$

O conjunto de limites das variáveis em (3) é detalhado em (13)-(19).

$$Q_{gk}^{min} \leq Q_{gk} \leq Q_{gk}^{max} \quad (k \in \Omega_G) \quad (13)$$

$$f_{min} \leq f_{MG} \leq f_{max} \quad (14)$$

$$V_{min} \leq V_k \leq V_{max} \quad (k \in \Omega_B) \quad (15)$$

$$f_k^{*min} \leq f_k^* \leq f_k^{*max} \quad (k \in \Omega_G) \quad (16)$$

$$V_k^{*min} \leq V_k^* \leq V_k^{*max} \quad (k \in \Omega_G) \quad (17)$$

$$s_{pk}^{min} \leq s_{pk} \leq s_{pk}^{max} \quad (k \in \Omega_G) \quad (18)$$

$$s_{qk}^{min} \leq s_{qk} \leq s_{qk}^{max} \quad (k \in \Omega_G) \quad (19)$$

em que  $f_{MG}$  é a frequência da microrrede;  $V_k$  é a magnitude da tensão nodal (incluindo as barras geradoras);  $f_k^*$  e  $V_k^*$  são as referências de frequência e tensão;  $s_{pk}$  e  $s_{qk}$  são as inclinações da curva de *droop*  $P - f$  e  $Q - V$ .

### 2.3 Metodologia para Alocação de Geradores Distribuídos em Microrredes Ilhadas

A Figura 2 mostra uma microrrede ilustrativa com cinco barras candidatas à alocação de geradores distribuídos. Deve-se decidir pela alocação ( $CH_i = 1$ ) ou não ( $CH_i = 0$ ) das

unidades em cada barra visando-se minimizar as perdas de potência ativa no sistema.

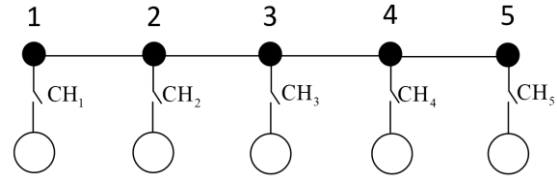


Fig. 2 Sistema ilustrativo.

Considerando-se a alocação de geradores nas barras 1 e 3, a equação (20) representa o vetor solução associado.

$$\mathbf{x} = [1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0] \quad (20)$$

Para a avaliação da qualidade da solução dada em (20), procede-se com o seguinte procedimento:

1. Executa-se o FPO descrito na Seção 2.2 para obtenção das mínimas perdas de potência ativa para a configuração dada pelo vetor solução;
2. Aplica-se uma penalização elevada a solução caso diverja.

Para a busca da melhor solução (configuração) que minimize as perdas, esse trabalho aplica um Algoritmo Genético (AG) binário. O AG é baseado nos mecanismos de seleção natural. Inspirado na Teoria da Evolução de Darwin, seu algoritmo consiste em manter uma população de indivíduos que representem uma solução para o problema, selecionar as melhores soluções para cruzamento e usar os filhos para substituição das piores soluções. Adicionalmente aplica-se um operador de mutação para diversificar o processo de busca (Goldberg, 1989).

Considerando  $nind$  indivíduos para a solução do problema dado na Figura 2, a população do AG é representada por uma matriz  $nind \times 5$ , em que cada linha é associada a uma solução a ser avaliada conforme o procedimento anteriormente discutido. Adicionalmente, considera-se um número exato de geradores a serem alocados ( $ngd$ ): indivíduos que não respeitem essa restrição são descartados (recebem uma penalização elevada).

Embora o AG tenha sido amplamente aplicado para a solução do problema de alocação de geradores distribuídos em sistemas de distribuição (Georgilakis & Hatzargyriou, 2013), cita-se que o problema de alocação de geradores em microrredes ilhadas (onde deve-se considerar a variação da frequência) é relativamente novo na literatura. O principal objetivo é apresentar resultados iniciais que serão comparados em trabalhos futuros dos autores (usando outras metaheurísticas). Cita-se ainda que, neste trabalho, foi realizada uma busca exaustiva para comparação dos resultados.

## 3. RESULTADOS

### 3.1 Descrição da Microrrede

Os resultados preliminares obtidos pela metodologia proposta são apresentados nesta seção para uma microrrede ilhada de 33

barras. Os dados originais (cargas e dados das linhas de distribuição) estão disponíveis em (Baran & Wu, 1989). O ilhamento ocorre a partir da desconexão entre os nós 33 (subestação) e 1, conforme pode ser visto na Figura 3. As bases de potência, tensão e frequência são 1MVA, 12,66kV e 60Hz, respectivamente. Adota-se como referência angular a barra 1. No ponto de operação nominal considerado, a carga ativa atendida é de 3,715 MW e 2,3 MVar.

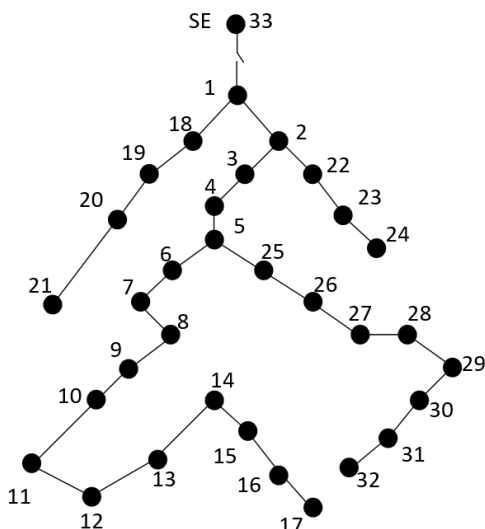


Fig. 3 Microrrede ilhada de 33 barras.

Deseja-se definir as melhores posições para 3 unidades de geração de 2,0 MVA. A execução do FPO descrito na Seção é realizada considerando os limites da Tabela 1.

Tabela 1. Limites

Variável	Mínimo	Máximo
$S_{gk}$ (MVA)	0	2,0
$Q_{gk}$ (MVar)	-1,2	1,2
$f_{MG}$ (Hz)	59,7	60,3
$V_k$ (pu)	0,9	1,1
$f_k^*$ (Hz)	59,7	60,3
$V_k^*$ (pu)	0,9	1,1
$s_{pk}$ (pu)	1,0e-5	1,0e-1
$s_{qk}$ (pu)	1,0e-5	1,0e-2

A metodologia foi implementada em Matlab (versão 2010a) empregando-se a *toolbox* de otimização: (i) o FPO é resolvido pela função *fmincon* baseada no Método de Pontos Interiores e (ii) o AG utilizado é o disponível na referida plataforma. Utilizou-se um computador Intel Core i7 1.80 GHz com 16 GB of RAM e Sistema operacional Windows 10 64-bit.

### 3.2 Busca Exaustiva

É sabido da literatura técnica que metaheurísticas (como o AG) não garantem soluções ótimas: estas fornecem soluções de boa qualidade em um tempo computacional razoável (Yang, 2014). A solução ótima para o problema de alocação de GD é garantida pela análise de todas as possibilidades, em um processo denominado de Busca Exaustiva (BE). Considerando-se 32 barras candidatas para a alocação de 3 unidades de geração, existem 4960 soluções possíveis. Todas

as soluções foram avaliadas através do FPO neste trabalho. Destas, somente 61,8% (3065 soluções) são factíveis, isto é, o FPO alcança a convergência.

O tempo computacional para a avaliação de todas as 4960 soluções foi de 29,3 horas: ressalta-se que a BE se torna computacionalmente onerosa e inviável a medida que a complexidade do problema aumenta: (i) maior número de cenários (curva de carga), (ii) maior número de barras e de geradores a serem alocados. Assim sendo, a aplicação do AG é atrativa, mesmo que a solução ótima não seja garantida. A Tabela 2 apresenta o resultado da BE.

Tabela 2. Solução ótima global (Busca Exaustiva)

Barras	Perdas (kW)	$f_{MG}$ (Hz)
2, 12, 29	16,55	59,79

### 3.3 Resultados do AG

O AG foi executado considerando uma taxa de cruzamento de 0,60 e uma taxa de mutação de 0,05. Foram considerados dois conjuntos de simulações (sendo realizadas 10 execuções para cada um partindo-se da mesma população inicial, todas factíveis): (i) AG-01 com 40 indivíduos e 50 gerações; e (ii) AG-02 com 40 indivíduos e 60 gerações.

A Tabela 3 apresenta as melhores soluções e as compara com aquela proveniente da BE: observa-se que o aumento do número de gerações permitiu que o AG-02 alcançasse o ótimo global do problema (o que ocorreu duas vezes).

Tabela 3. Comparativo das melhores soluções

--	AG - 01	AG - 02	BE
Barras	11, 23, 29	2, 12, 29	2, 12, 29
Perdas (kW)	16,69	16,55	16,55
$f_{MG}$ (Hz)	59,79	59,79	59,79
$V_{min}$ (pu)	1,09	1,08	1,08
$V_{max}$ (pu)	1,10	1,10	1,10
Tempo de Simulação (h)	4,45	4,71	29,30

É importante observar que o tempo médio de simulação (em horas) para os dois conjuntos de simulações do AG é bem reduzido em relação ao despendido pela BE. Primeiramente ressalta-se que a BE avalia todas as possíveis soluções (4960 FPO são executados): na ocorrência de uma solução infactível (existem 1895 soluções infactíveis), a função *fmincon* consome um tempo maior para executar o FPO (e indicar a divergência) e isso é levado em consideração no tempo total da BE. O número máximo de FPO executados pelo AG em ambos os casos é 2000 para o AG-01 (40 indivíduos x 50 gerações) e 2400 para o AG-02 (40 indivíduos x 60 gerações): entretanto esse número não é sempre alcançado, pois um indivíduo que aloque um número diferente de 3 geradores no sistema não possui sua qualidade avaliada pelo FPO.

A Figura 4 apresenta o diagrama de caixas (*boxplot*) obtido a partir das 10 simulações do AG considerando 50 e 60 gerações. Conforme (Douglas C. Montgomery; George C. Runger, 2014), dois pontos importantes podem ser levantados: a mediana e a qualidade das soluções (do ponto de vista de variabilidade das soluções).

A mediana (linha vermelha no interior da caixa) indica o valor no qual 50% das demais soluções são menores ou maiores que ele: para o problema em questão, a mediana do AG-01 é de 19,489 kW e do AG-02 é de 17,985 kW. Esse valor confirma o que é o de conhecimento da literatura: o emprego de um maior número de gerações (e/ou indivíduos) pode melhorar a qualidade da solução obtida.

Graficamente, observa-se que as soluções do AG-01 e do AG-02 estão bem dispersas, mostrando a alta variabilidade destas. Numericamente, o cálculo do desvio padrão (2,80 kW para o AG-01 e 2,46 kW para o AG-02) confirma a proximidade da qualidade das soluções no quesito variabilidade.

Ressalta-se que o Apêndice A apresenta os resultados do FPO para as melhores soluções da Tabela 3.

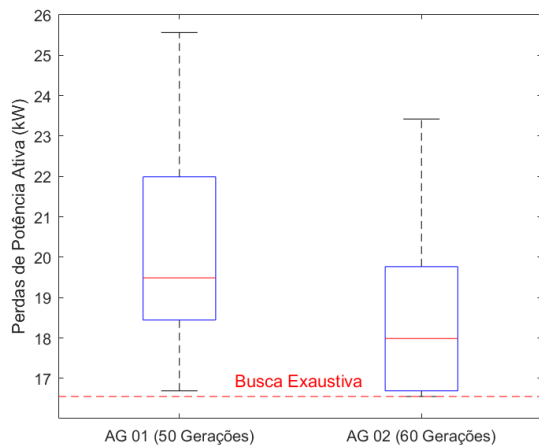


Fig. 4 Comparação entre as soluções.

### 3.4 Discussão

Os seguintes pontos resumem as principais observações do presente trabalho:

1. Embora o Algoritmo Genético tenha sido amplamente aplicado para solução do problema de alocação de geração distribuída em sistemas de distribuição, o mesmo problema aplicado à microrredes ilhadas considerando o efeito do *droop* é relativamente novo na literatura;
2. O aumento do número de geração permitiu que o AG alcançasse duas vezes a solução ótima global (obtida pela Busca Exaustiva) em um tempo computacional relativamente baixo;
3. A variabilidade das soluções é uma questão importante e deve ser solucionada a partir da melhoria do AG ou utilização de outras metaheurísticas recentemente propostas na literatura;
4. Uma análise do impacto dos parâmetros do AG (taxa de cruzamento e mutação) deve ser conduzida;
5. Os resultados podem ser enriquecidos a partir da análise do impacto dos limites de frequência no valor ótimo global do problema;
6. Cenários adicionais de carga (leve/média/pesada ou curva de carga) devem ser considerados para tornar a análise mais realista.

## 4. CONCLUSÕES

Nesse trabalho, o problema de alocação ótima de geradores distribuídos para minimização de perdas em uma microrrede ilhada de 33 barras foi abordado. A solução do problema foi realizada por um Algoritmo Genético binário em que as soluções são avaliadas por um Fluxo de Potência Ótimo considerando o efeito de *droop* dos geradores (conectados à microrrede via *Voltage Source Inverters*).

A metodologia desenvolvida foi executada considerando diferentes número de gerações, sendo capaz de alcançar, em algumas das simulações, o ótimo global fornecido por uma busca exaustiva. Ressalta-se que a execução do AG foi feita empregando, em média, 15,6% do tempo total exigido pela busca exaustiva.

Os trabalhos futuros estarão focados na consideração de outras metaheurísticas, de diferentes cenários, e na avaliação do impacto dos limites de frequência na solução do problema de alocação.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPEMIG, CAPES (Finance Code 001), CNPq e PPGEL/UFSJ pelo auxílio financeiro.

## REFERÊNCIAS

- Baran, M. E., & Wu, F. F. (1989). Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 4(2), 1401–1407. <https://doi.org/10.1109/61.25627>
- Coelho, F. C. R., Peres, W., Silva Júnior, I. C., & Dias, B. H. (2020). Empirical continuous metaheuristic for multiple distributed generation scheduling considering energy loss minimisation, voltage and unbalance regulatory limits. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 14(16), 3301–3309. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2019.1860>
- Dias, B. H., Oliveira, L. W., Gomes, F. V., Silva, I. C., & Oliveira, E. J. (2012). Hybrid heuristic optimization approach for optimal Distributed Generation placement and sizing. *2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/PESGM.2012.6345653>
- Douglas C. Montgomery; George C. Runger. (2014). *Applied Statistics and Probability for Engineers* (Sixth Edit). John Wiley & Sons, Inc.
- El-hawary, M. E. (2014). The Smart Grid—State-of-the-art and Future Trends. *Electric Power Components and Systems*, 42(3–4), 239–250. <https://doi.org/10.1080/15325008.2013.868558>
- Foroutan, V. B., Moradi, M. H., & Abedini, M. (2016). Optimal operation of autonomous microgrid including

- wind turbines. *Renewable Energy*, 99, 315–324. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.07.008>
- Georgilakis, P. S., & Hatziargyriou, N. D. (2013). Optimal Distributed Generation Placement in Power Distribution Networks: Models, Methods, and Future Research. *IEEE Transactions on Power Systems*, 28(3), 3420–3428. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2012.2237043>
- Goldberg, D. E. (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Addison-Wesley.
- Gómez-Expósito, A., Conejo, A. J., & Cañizares, C. (Eds.). (2017). *Electric Energy Systems*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420007275>
- Gupta, Y., Doolla, S., Chatterjee, K., & Pal, B. C. (2021). Optimal DG Allocation and Volt–Var Dispatch for a Droop-Based Microgrid. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 12(1), 169–181. <https://doi.org/10.1109/TSG.2020.3017952>
- Gupta, Y., Nellikkath, R., Chatterjee, K., & Doolla, S. (2020). Volt–VAR Optimization and Reconfiguration – Reducing Power Losses in a Droop Based Microgrid. *2020 IEEE International Conference on Power Electronics, Smart Grid and Renewable Energy (PESGRE2020)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/PESGRE45664.2020.9070397>
- Hemmatpour, M. H., Mohammadian, M., & Gharaveisi, A. A. (2016). Optimum islanded microgrid reconfiguration based on maximization of system loadability and minimization of power losses. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 78, 343–355. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2015.11.040>
- Kundur, P. (1994). *Power System Stability and Control*. McGraw-Hill .
- La Gatta, P. O., Passos Filho, J. A., & Pereira, J. L. R. (2019). Tools for handling steady-state under-frequency regulation in isolated microgrids. *IET Renewable Power Generation*, 13(4), 609–617. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2018.5172>
- Lasseter, R. H. (2002). MicroGrids. *2002 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.02CH37309)*, 1, 305–308. <https://doi.org/10.1109/PESW.2002.985003>
- Lopes, J. A. P., Moreira, C. L., & Madureira, A. G. (2006). Defining Control Strategies for MicroGrids Islanded Operation. *IEEE Transactions on Power Systems*, 21(2), 916–924. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2006.873018>
- Milano, F. (2010). *Power System Modelling and Scripting* (S. & B. Media (Ed.)). <https://doi.org/10.1201/b10643-40>
- Yang, X.-S. (Ed.). (2014). *Nature-Inspired Optimization Algorithms*. In *Nature-Inspired Optimization Algorithms* (p. i). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-416743-8.00016-6>
- Zhang, M., Gan, M., & Li, L. (2019). Sizing and Siting of Distributed Generators and Energy Storage in a Microgrid Considering Plug-in Electric Vehicles. *Energies*, 12(12), 2293. <https://doi.org/10.3390/en12122293>

## Apêndice A. SOLUÇÃO DO FPO

O presente apêndice apresenta, nas Tabelas 4 a 6, a solução do FPO para as melhores soluções considerando 50 gerações (AG-01) e 60 gerações (AG-02).

Tabela 4. Potências geradas

--	AG - 01	AG - 02
$P_{g1}$ (MW)	0,9927	1,7966
$P_{g2}$ (MW)	1,6167	0,8276
$P_{g3}$ (MW)	1,1223	1,1074
$Q_{g1}$ (MVar)	0,4711	0,8788
$Q_{g2}$ (MVar)	0,7860	0,3892
$Q_{g3}$ (MVar)	1,0559	1,0453
$S_{g1}$ (MVA)	1,0988	2,0000
$S_{g2}$ (MVA)	1,7976	0,9145
$S_{g3}$ (MVA)	1,5410	1,5228

Tabela 5. Valores de referência

--	AG - 01	AG - 02
$f_1^*$ (Hz)	60,11	60,12
$f_2^*$ (Hz)	60,12	60,11
$f_3^*$ (Hz)	60,11	60,11
$V_1^*$ (pu)	1,10	1,10
$V_2^*$ (pu)	1,10	1,10
$V_3^*$ (pu)	1,10	1,10

Tabela 6. Coeficientes de droop

--	AG - 01	AG - 02
$s_{p1}$ (pu)	5,3797e-03	3,0055e-03
$s_{p2}$ (pu)	3,3527e-03	6,4579e-03
$s_{p3}$ (pu)	4,8007e-03	4,8210e-03
$s_{q1}$ (pu)	3,3172e-04	2,4604e-03
$s_{q2}$ (pu)	1,0787e-05	9,1381e-05
$s_{q3}$ (pu)	1,0818e-05	1,2000e-05