

## REDUÇÃO DE PERDAS ATRAVÉS DE ALOCAÇÃO INTELIGENTE DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA FOTOVOLTAICA EM REDE DE DISTRIBUIÇÃO

Jairo Giacomini Jr<sup>1</sup>, Juan Carlos Cebrian<sup>2</sup>, Helmo Kelis Morales Paredes<sup>2</sup>, André Rossi<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universidade Estadual Paulista (UNESP) – ICTS, [jairo.giacomini@unesp.br](mailto:jairo.giacomini@unesp.br)

<sup>2</sup>Universidade Estadual Paulista (UNESP) – Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba (ICTS)

<sup>3</sup>Universidade Estadual Paulista (UNESP) – Instituto de Ciências e Engenharia de Itapeva (ICE)

### Resumo

A inserção massiva e não planejada de GD-FV pode levar a instabilidades na operação da rede de distribuição. Métodos de otimização são utilizados para identificar a localização e o dimensionamento de GD-PVS para maximizar seus benefícios. Neste artigo, a meta-heurística *Particle Swarm Optimization* (PSO) é usada para resolver o problema de alocação de GD-PVS, minimizando os custos de implementação ( $C_{inv}$ ), as perdas elétricas em condições normais de operação (PEE) e, as perdas financeiras nos consumidores causadas por afundamentos de tensão (PEA) em condições de contingência (faltas elétricas). Os benefícios ambientais também são considerados no processo de otimização. Os resultados mostram reduções de até 9% de PEE e até 14% de PEA, trazendo benefícios às concessionárias, aos clientes e ao meio ambiente.

**Palavras-chave.** Geração distribuída. Sistema fotovoltaico. Afundamento de tensão. Minimização de perdas. Otimização por enxame de partículas.

### Introdução

A cada dia tornam-se mais comuns nas redes elétricas cenários em que há inserção massiva de geração distribuída (GD) principalmente de sistemas fotovoltaicos (FV). O uso de GD-FV pode ser benéfico às redes, contribuindo, por exemplo, na redução das perdas elétricas e, em conjunto com os recursos implementados nos inversores, contribuem também na redução os afundamentos de tensão decorrentes de uma falta elétrica. A mesma GD-FV, quando presente em elevados índices de penetração, pode causar problemas na coordenação do sistema de proteção (CARNEIRO *et al.*, 2022) e sofrer com a possibilidade de intermitência nos níveis de geração.

Diversos estudos vêm sendo realizados em busca de soluções relacionadas ao dimensionamento e a alocação da GD na rede de distribuição. Comumente são investigadas as reduções das perdas elétricas; melhora dos níveis de tensão e taxa de distorção harmônica; e redução dos custos de interrupções de energia (RAZAVI *et al.*, 2019). Por ser um problema com características não-lineares e diversas restrições, têm-se utilizado métodos heurísticos como algoritmos genéticos, lógica fuzzy, colônia de abelhas ou enxame

de partículas (MOREIRA *et al.*, 2022).

Neste artigo, o problema de alocação de GD-FV é abordado com a utilização da meta-heurística *Particle Swarm Optimization* (PSO). A abordagem proposta considera as perdas financeiras nos consumidores - devido a afundamentos de tensão oriundos de faltas na rede - e o benefício ao meio ambiente trazido pelo uso de uma fonte renovável (e.g., GD-FV), permitindo identificar alternativas de dimensionamento de GD-FV e suas respectivas localizações que possam beneficiar a rede elétrica em condições normais de operação e aos consumidores sensíveis durante afundamentos de tensão em condições de contingência.

## **Materiais e Métodos**

A metodologia proposta por CEBRIAN; MILANOVIC; KAGAN, (2015) é utilizada para estimar o número de paradas de processos produtivos devido a afundamentos de tensão para os consumidores da rede no período de um ano. Esta baseia-se na simulação de um grande número de eventos (faltas elétricas), representado por suas variáveis como o tipo, impedância e posição. A magnitude e a duração do afundamento relacionados com a curva de sensibilidade do processo produtivo irão definir se um consumidor realmente será afetado por este evento (BOLLEN *et al.*, 2010).

Em (1), mostra-se o cálculo do valor anual das PEA para uma rede com  $N_c$  consumidores:

$$PEA = \sum_1^{N_c} N_{pp} \cdot F_{custo} \quad (1)$$

em que:

$N_{pp}$ : Número de parada de processo anuais devido a afundamento para um consumidor;

$F_{custo}$ : Custo unitário de parada de processo por tipo de consumidor (MILANOVIC; GUPTA, 2006) – [Custos unitários por tipo de consumidor: Residencial R\$ 6,2; Comercial R\$ 692 e Industrial R\$17000]

### *Otimização por enxame de partículas – PSO*

O algoritmo de otimização por enxame de partículas (PSO) é inspirado no comportamento social dos animais na busca por alimento. Para a solução do problema de alocação de GD-FV neste trabalho utiliza-se o PSO contínuo (KENNEDY; EBERHART, 1995). Uma população aleatória de partículas é gerada, onde cada dimensão da partícula representa uma

barra da rede, enquanto o valor de cada dimensão representa a potência nominal em kW da GD-FV candidata a ser alocada na respectiva barra.

A avaliação do desempenho de cada partícula é verificada através da função objetivo descrita para o problema, que leva em consideração as restrições impostas para a solução (GIACOMINI JR, 2020). A função objetivo (FO) completa, a ser minimizada pelo PSO é mostrada em (2).

$$F.O. = (\alpha.PEA + \beta.Cinv - \gamma.Amb - \delta.PEE).fpen \quad (2)$$

em que:

PEA: Custo das perdas financeiras anuais da rede devido a afundamentos de tensão;

Cinv: Custo limite de investimento em GD-FV;

Amb: Benefício ambiental (redução da emissão de CO<sub>2</sub>);

PEE: Economia anual pela redução das perdas elétricas na rede;

Fpen: Fator de penalização que relaciona as restrições;

$\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ : Fatores de ponderação.

## Resultados

A metodologia descrita é aplicada em uma rede de distribuição real de 142 barras, com 15 km de extensão total e 2667 consumidores (25 são industriais) totalizando 6430 kW instalados. A tensão nominal primária é de 13,8 kV e a secundária é de 220 V e a filosofia de proteção adotada é a "salva-fusível". Em (GIACOMINI JR, 2020) é mostrada a topologia da rede e os demais dados referentes a linhas, demandas de consumidores e curvas dos dispositivos de proteção.

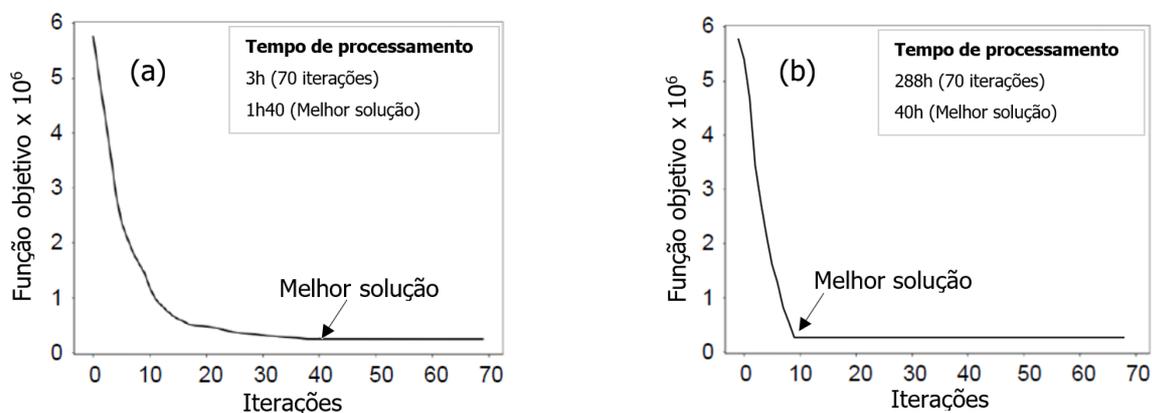
Inicialmente um cenário sem o uso de GD-FV (caso base) é considerado, servindo de referência para os cenários posteriores que utilizam as GD-FV dimensionadas e alocadas através do algoritmo PSO. Assim pode-se mensurar as variações ocorridas nas perdas financeiras dos consumidores em decorrência de afundamentos de tensão.

Nas simulações deste artigo foram executados 1000 curto-circuito com a taxa de falhas de 2,5 faltas/km por ano. As GD-FV podem ser dimensionadas com potências limitadas a 75 kW (limite para microgeração) e nunca podem superar uma taxa de penetração limitada à 30% da potência instalada (aproximadamente 2000 kW); além disso, as tensões em toda a rede não podem variar além de 5% da tensão nominal. O limite financeiro considerado, foi de R\$ 9.000.000. Na parametrização do algoritmo de PSO considerou-se a utilização de 50 partículas limitadas em 70 iterações com os coeficientes  $C1 = 2$ ;  $C2 = 2$  e  $W = 0,75$  (RAO, 2009).

No primeiro cenário com GD-FV desconsiderou-se a parcela referente as perdas financeiras devido a afundamentos de tensão da função objetivo do PSO ( $\alpha=0$ ;  $\beta=0,05$ ;  $\gamma=1$ ;  $\delta=2$ ); assim o algoritmo não considera o valor de tais perdas em suas iterações, poupando recurso computacional, sendo o valor obtido ao final (com as mesmas condições do caso base) em função da melhor solução encontrada pelo PSO. Já no segundo cenário, utilizou-se a função objetivo em sua forma completa ( $\alpha= 0,4$   $\beta=0,04$ ;  $\gamma=3$ ;  $\delta=5$ ), agora o valor das perdas financeiras é calculado em todas as iterações do PSO, o que aumenta a necessidade de recurso computacional, mas dessa forma espera-se resultados ainda melhores.

A evolução do custo das funções objetivos para os cenários 1 e 2 ao longo das iterações é mostrada na figura 1. Observa-se que no cenário 1, o PSO, atingiu a melhor solução em aproximadamente 40 iterações. Neste cenário foram alocadas GD-FV em 22 barras da rede (vide figura 2.a), todas com potências nominais de aproximadamente 75kW, atingindo uma taxa de penetração de aproximadamente 25%. Já para o cenário 2, a melhor solução foi atingida em 10 iterações, com a alocação de GD-FV também em 22 barras (vide figura 2.b), porém com potências nominais próxima a 65 kW.

Figura 1. Evolução da função objetivo utilizando PSO nos cenários 1 (a) sem considerar as PEA e 2 (b) função objetivo completa, junto da indicação da iteração com a melhor solução.



Os resultados obtidos nos dois cenários considerados e comparados com o caso base são mostrados na Tabela 1. Já na Tabela 2 há um comparativo entre os resultados que não se relacionam com o caso base.

A solução obtida com o PSO no cenário 1, mostrou redução, em relação ao caso base (sem GD), de aproximadamente 14% nas PEA e a solução obtida no cenário 2 apresentou redução de 5% nas PEA; em relação ao custo das PEE anuais na rede, a solução da etapa 1, reduziu em 8,5% e a solução da etapa 2 conseguiu redução de 9%; a redução

de emissão anual de CO<sub>2</sub> obtida no cenário 1 é 15 % superior ao do cenário 2, porém, em termos de montantes de investimentos, a solução obtida da cenário 2 é a mais econômica, necessitando de um montante 13% menor do que o exigido pela solução da cenário 1. Nota-se que o esforço computacional para o cenário 2 é muito mais elevado, quando comparado ao cenário 1 devido ao cálculo das perdas financeiras em todas as iterações.

Figura 2. Posição das GD-FV alocadas na rede de distribuição para os cenários 1 (a) e 2 (b).

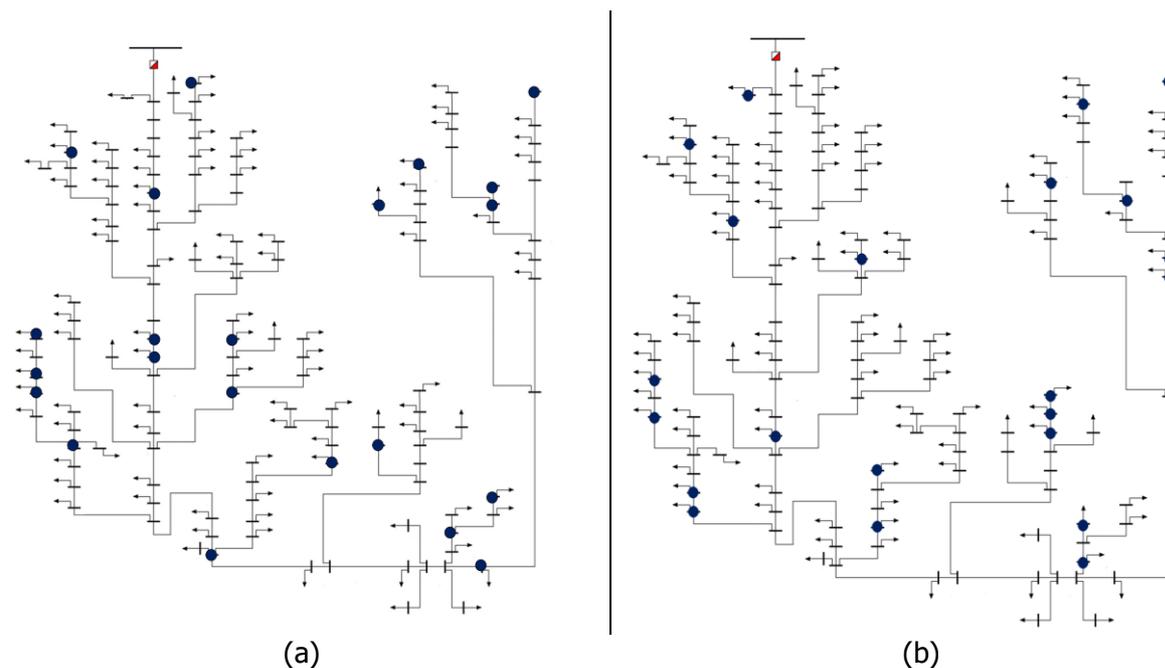


Tabela 1. Comparação dos resultados (em R\$ x1000/Ano)

	Caso Base	Cenário 1	Cenário 2
Perdas afundamento (PEA)	1510	1295 (14% redução)	1440 (5% redução)
Perdas elétricas (PEE)	397,2	363,3 (8,5% redução)	362 (9% redução)

Tabela 2. Comparação dos resultados entre as soluções dos cenários 1 e 2

	Cenário 1	Cenário 2
Investimento GD-FV (em R\$ x1000/Ano)	6490	5645 (13% menor)
Emissão de CO <sub>2</sub> (em kg/Ano)	77300 (15% maior)	67000

## Conclusões

Este artigo aborda a alocação inteligente de GD-FV de considerando, conjuntamente, aspectos operacionais e ambientais das redes elétricas de distribuição. Para isso, a

metaheurística exame de partículas (PSO) é utilizada exaustivamente para obter alternativas de alocação atraentes. Em relação aos aspectos operacionais, o modelo proposto permite reduzir as perdas elétricas (PEE) e as perdas financeiras devido a afundamentos de tensão (PEA).

As PEA são muitas vezes desconsideradas no processo de alocação, porém elas representam uma parcela muito maior em relação as PEE. É importante destacar que o custo de investimento em GD-FV é relativamente elevado em comparação com o custo das PEE, contudo, quando também considera-se as PEA, o investimento em GD-FV pode se tornar atraente e justificar empreendimentos que possam ser aplicados pelos consumidores, concessionárias de energia ou por políticas públicas. A alocação de GD-FV também trouxe reduções nas emissões de CO<sub>2</sub> na atmosfera, beneficiando direta e indiretamente a sociedade.

## Referências Bibliográficas

BOLLEN, M.; GORDON, J. R.; DJOKIC, S.; STOCKMAN, K.; MILANOVIC, J.; NEUMANN, R.; ETHIER, G.; ZAVODA, F. **Voltage dip immunity of equipment and installations - Status and need for further work.** *China International Conference on Electricity Distribution*, no. January, 2010.

CARNEIRO, C. A.; SILVA, G. B.; JUNIOR, J. G.; CEBRIAN, J. C.; MORALES-PAREDES, H. K. **Impact of Distributed Energy Resources on Fault Location, Isolation, and Service Restoration.** 2022. *2022 17th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS)*, 2022. p. 1–6. <https://doi.org/10.1109/PMAPS53380.2022.9810565>.

CEBRIAN, J. C.; MILANOVIC, J. V.; KAGAN, N. **Probabilistic assessment of financial losses in distribution network due to fault-induced process interruptions considering process immunity time.** *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 30, no. 3, p. 1478–1486, 2015. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2014.2364558>.

GIACOMINI JR, J. **Alocação inteligente de geração fotovoltaica em redes elétricas de distribuição para redução de perdas financeiras em consumidores industriais sensíveis a afundamentos de tensão.** 2020. 128 f. Universidade Estadual Paulista, 2020.

KENNEDY, J.; EBERHART, R. **Particle swarm optimization.** 4., Nov. 1995. *Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks*, Nov. 1995. vol. 4, p. 1942–1948 vol.4. <https://doi.org/10.1109/ICNN.1995.488968>.

MILANOVIC, J. V.; GUPTA, C. P. **Probabilistic Assessment of Financial Losses due to Interruptions and Voltage Sags — Part II: Practical Implementation.** no. December, 2006. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2006.870987>.

MOREIRA, A.; MOLINA, Y.; AQUINO, R.; ÑAUPARI, Z. **Allocation and Sizing of Photovoltaic Systems to Reduce Power Losses and Economic Aspects using a new PSO approach.** *IEEE Latin America Transactions*, vol. 20, no. 6, p. 977–985, 2022. <https://doi.org/10.1109/TLA.2022.9757741>.

RAO, S. S. **Engineering Optimization: Theory and Practice: Fourth Edition.**, 2009. <https://doi.org/10.1002/9780470549124>.

RAZAVI, S. E.; RAHIMI, E.; JAVADI, M. S.; NEZHAD, A. E.; LOTFI, M.; SHAFIE-KHAH, M.; CATALÃO, J. P. S. **Impact of distributed generation on protection and voltage regulation of distribution systems: A review.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 105, no. May 2018, p. 157–167, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.01.050>.