

Reconfiguração de Redes de Distribuição de Energia Elétrica com Geração Fotovoltaica Utilizando FPA

Yanick R. Gomes* Edmarcio A. Belati* Renzo Vargas*
Priscila Rossoni*

* *Centro de Engenharia, Modelagem e ciências sociais Aplicada,
Universidade Federal do ABC, SP, (e-mails:
yanick.rodolfo@ufabc.edu.br; edmarcio.belati@ufabc.edu.br;
rvargaspe@gmail.com; priscila.rossoni@ufabc.edu.br*

Abstract: This article presents an approach based on the Flower Pollination Algorithm to solve the radial distribution network reconfiguration problem considering photovoltaic systems. The objective function minimizes the energy losses in the network. Four different cases are presented to analyze the impact of network reconfiguration and photovoltaic systems on the objective function of the problem. The tests are carried out through a distribution system of 33 nodes and 37 lines, considering an average load curve provided by a local distributor and a photovoltaic system connected to a medium voltage consumer located in Santo André, Brazil. The results show a reduction of up to 35% of energy losses using the proposed approach, which indicates a technique that is efficient, robust and suitable for large systems. approach..

Resumo: Este artigo apresenta uma abordagem baseada no Algoritmo de Polinização de Flores para resolver o problema de reconfiguração da rede de distribuição radial de energia elétrica considerando sistemas fotovoltaicos. A função tem como objetivo minimizar as perdas de energia na rede. Quatro casos diferentes são apresentados para analisar o impacto da reconfiguração da rede e dos sistemas fotovoltaicos na função objetiva do problema. Os testes são realizados por meio de um sistema de distribuição de 33 nós e 37 linhas, considerando uma curva média de carga fornecida por uma distribuidora local e um sistema fotovoltaico conectado a um consumidor de média tensão localizado em Santo André, Brasil. Os resultados mostram uma redução de até 35% das perdas de energia utilizando a abordagem proposta, o que indica uma técnica eficiente e adequada para sistema de grande porte.

Keywords: Flower Pollination Algorithm, Load Curve, Photovoltaic Generation, Energy Losses, Electricity Distribution System Reconfiguration.

Palavras-chaves: Algoritmo de Polinização de Flores, Curva de Carga, Geração Fotovoltaica, Perdas de Energia, Reconfiguração de Sistema de Distribuição de Energia Elétrica.

1. INTRODUÇÃO

O setor elétrico vive um momento de transformação impulsionado pelo uso de novas fontes de energia renováveis, essenciais para a descarbonização do sistema elétrico. Diante disso, muitos países se comprometeram a descarbonizar o setor elétrico, no qual mais de 195 países assinaram o Acordo de Paris, incluindo o Brasil, cujo objetivo reduzir o aquecimento global (Carvalho, 2017).

A preocupação com a descarbonização do setor elétrico traz a possibilidade de descentralizá-lo através de fontes renováveis, com destaque para a Geração Distribuída (GD) sobretudo Geração Fotovoltaica (GF), que tem crescido exponencialmente nos últimos anos. A GF pode ser instala-

lada próxima ao consumidor, pois é de fácil instalação em prédios, indústrias e residências (Gomes et al., 2021).

A Empresa de Pesquisa Energética (EPE), mostra uma expansão significativa da GD com fontes renováveis no plano decenal de extensão energética 2030, portanto, uma redução de combustíveis fósseis e outras fontes não renováveis, ou seja, um reflexo da descarbonização (EPE, 2021).

Partindo do pressuposto da Descarbonização e Descentralização, destaca-se o uso da otimização, visto que a integração de novas fontes renováveis no setor elétrico, como a GF, estão causando preocupações devido ao seu caráter intermitente, levando muitos pesquisadores a optarem por métodos de otimização para melhorar a operação do sistema elétrico (Song et al., 2020).

De acordo com Gerez et al. (2019), as GDs, como exemplo a GF, muitas vezes são adicionadas às redes sem uma análise técnica, o que pode prejudicar o sistema, principalmente o sistema de distribuição, levando-o a operar

* Agradecimento ao suporte financeiro da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e do Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento, código ANEEL 00390-1083-2020.

com altas perdas e muitas vezes fora dos limites operacionais. Para minimizar problema de energia na rede de distribuição com GDs, a Reconfiguração de Sistema de Distribuição de Energia Elétrica (RSDEE) pode ser aplicada, fazendo com que a rede volte a operar dentro dos limites operacionais com perdas mínimas.

A RSDEE pode ser aplicada sempre que necessário, pois é uma ação de baixo custo, envolvendo apenas a abertura e fechamento de chaves manobráveis existentes na rede (Gomes et al., 2021).

A abertura e o fechamento de chaves, que interligam os nós da rede, fazem com que a topologia do sistema altere, remanejando os fluxos de potência das linhas sobrecarregadas para as menos solicitadas, o que diminui as perdas ôhmicas devido ao efeito Joule. A maioria das redes opera em topologia radial, o que favorece à coordenação de proteção da rede (Tran et al., 2021).

A solução para o problema de RSDEE é obtida quando a configuração que apresenta o menor valor de perdas de energia é encontrada. Contudo, devido à natureza combinatória do problema, a busca da solução ótima é extremamente onerosa do ponto de vista computacional, principalmente para sistemas reais, em razão do número de configurações factíveis existentes. Seja qual for o método escolhido para RSDEE, a premissa é que em uma rede com n chaves, a quantidade de possibilidades de configuração é dada por 2^n .

Na literatura há uma grande variedade de trabalhos relacionados ao problema de RSDEE, desde que os pesquisadores Merlin and Back (1975) propuseram o uso do método discreto de Branch and Bound para reduzir perdas ôhmicas. A literatura especializada apresenta diversas metodologias de RSDEE, que utilizam diversas técnicas de solução (Peponis and Papadopoulos, 1995; Gerez et al., 2019; Nguyen et al., 2016). Alguns trabalhos tratam a RSDEE com presença de GD. Em Zhao et al. (2020), foi proposto um modelo de reconfiguração dinâmica multiobjetivo com base na taxa de perda de energia considerando as variações nas saídas de GD oferecendo uma estratégia mais adequada para o gerenciamento da operação prática de um moderno sistema de rede de distribuição. Em Ghasemi and Moshtagh (2015), apresentou uma estratégias operacionais como capacidade de controle de carga, formação de micro geração e reconfiguração de rede são integradas aos planos do sistema de distribuição para melhoria de resiliência tanto no planejamento quanto nas etapas de resposta a emergências.

Como apresentado, existem várias técnicas utilizadas para resolver o problema de RSDEE, como matemático, híbrido, heurístico e meta-heurístico. O método heurístico fornece mínimos locais e não globais, o método matemático apresenta o poder financeiro e quanto maior dimensão do problema mais complexo torna, enquanto o método meta-heurístico, apresenta uma solução ótima global, simples de utilizar e tem sido explorada (Salman S.K, 2019).

No entanto, a técnica de polinização de flores, do inglês, Flower Pollination Algorithm (FPA) não foi muito explorada para o problema de RSDEE. O FPA foi proposto por Yang (2012) e é uma técnica de fácil implementação e

vem sendo aplicado nas soluções dos problemas complexos, apresentando resultados promissores (Jose et al., 2020).

Este artigo é oriundo do projeto estratégico da empresa de energia elétrica Enel, pelo edital 001/2016 da ANEEL do Projeto Prioritário de Eficiência Energética (PEE) de Pesquisa e Desenvolvimento intitulado: Eficiência Energética e Minigeração em Instituições Públicas de Ensino Superior. O projeto compreende a instalação de sistemas de geração fotovoltaica na UFABC, com capacidade de 473 kWp, totalmente interligados à rede de distribuição do sistema pré-existente na região do ABC na grande São Paulo.

O presente artigo propõe-se a utilização de uma abordagem baseada no FPA para a otimização do problema de reconfiguração de rede de distribuição com GF.

O artigo está organizado na forma exposta a seguir. Na Seção 2, o algoritmo de polinização de flores é apresentado. Na seção 3, a formulação do problema é apresentado. Na seção 4, os resultados dos testes computacionais são mostrados. Por fim, na seção 5, as conclusões do trabalho são apresentadas.

2. ALGORITMO DE POLINIZAÇÃO DE FLORES

Atualmente a natureza está resolvendo problemas complexos que há muitos anos era difícil de resolver, ou seja, a capacidade dos sistemas biológicos de se adaptarem de forma eficaz ao meio ambiente torna-se cada vez mais evolutiva (Neves, 2017).

Com base nas características desses sistemas biológicos, algoritmos inspirados na natureza foram desenvolvidos ao longo dos anos, com diferentes tipos de aplicações em diversas áreas, como engenharias, medicina, indústria e outras áreas.

De acordo com Neves (2017) a maioria dos algoritmos inspirados na natureza usa técnicas estocásticas na busca da solução ótima. Ou seja, o algoritmo parte de um conjunto de soluções iniciais aleatórias que, ao longo do processo iterativo, são atualizadas e melhoradas com base no mecanismo de cada algoritmo, até que o critério de parada estabelecido seja alcançado. Assim, eles possuem características estocásticas, mas são guiados por heurísticas. Esse processo é conhecida como meta-heurística.

Devido ao grande sucesso das meta-heurísticas nos últimos anos, principalmente na área de engenharia, muitos algoritmos têm sido propostos. Como exemplo, podemos citar o Algoritmo Genético (AG), o Algoritmo de Enxame de Partículas (PSO), o Algoritmo de Otimização de Colônia de Formigas (ACO) e o Algoritmo de Polinização de Flores, o FPA, utilizado neste trabalho.

Para Yang (2012), do ponto de vista da evolução biológica, o objetivo da polinização das flores é a reprodução ótima das plantas em termos de números, bem como a sobrevivência daquelas mais fortes. Ou seja, o processo de polinização pode ser visto como um recurso com vistas à otimização das espécies de plantas, o que levou Yang (2012) a idealizar o FPA.

O FPA usa como metáfora a polinização de plantas através das flores. Esses fatores representam os fundamentos do FPA e são orientados para otimização (Yang, 2012).

Em resumo:

- (1) Considera-se como processo global de polinização a polinização biótica (feitas por insetos, animais e aves) e polinização cruzada (que possuem grande variedade genética). Os polinizadores se movem de uma maneira que obedecem aos voos de Lévy.
- (2) A polinização abiótica e autopolinização são consideradas como polinização local, por não precisarem da ajuda de polinizadores. Ocorrem entre flores vizinhas, portanto são consideradas como busca local.
- (3) A constância da flor pode ser considerada como a probabilidade de reprodução, proporcional à semelhança de duas flores envolvidas no processo de polinização.
- (4) O processo de otimização segue etapas de polinização local e global, controlado por uma probabilidade de troca $p \in [0;1]$.

Na etapa de polinização global, polens são transportados por polinizadores (e.g. insetos), o que garante a polinização e a reprodução para otimização global. O modelo, nesse caso, é segundo a equação (1):

$$X_i^{t+1} = X_i^t + L(X_i^t - g_*) \quad (1)$$

em que:

- X_i^{t+1} = vetor solução na iteração $t + 1$;
- X_i^t = pólen da flor i ou solução do vetor X_i ;
- L = tamanho do passo que obedece aos voos de Lévy;
- g_* = melhor solução atual encontrada dentre todas as soluções até a geração/iteração atual.

O parâmetro L , definido na Equação (2), é baseado no voo de Lévy, que modela de forma muito eficaz o comportamento de insetos que se movem a curtas e longas distâncias:

$$L \sim \frac{\lambda \tau(\lambda) (\sin \frac{\pi \lambda}{2})}{\pi} \frac{1}{S^{2+\lambda}} \quad , \quad S \gg S_0 > 0 \quad (2)$$

onde:

- λ = fator de escala para controle do tamanho do passo;
- $\tau(\lambda)$ = função gama padrão, cuja distribuição é válida para grandes passos $S > 0$;
- S = tamanho do passo do voo ($S_0 > 0$), podendo assumir valores pequenos, como 0.1.

Na otimização por polinização local (abiótica), tem-se que:

$$X_i^{t+1} = X_i^t + \epsilon(X_j^t - X_k^t) \quad (3)$$

em que X_j^t e X_k^t representam polens de flores diferentes da mesma espécie. Matematicamente, o modelo (3) torna-se uma varredura aleatória para valores de ϵ uniformemente distribuídos. Ressalta-se que atividade de polinização de flores pode ocorrer tanto em local quanto global. Para

tanto, utiliza-se a probabilidade de trocas, ou probabilidade de proximidade (p), entre 0 e 1, para alternar entre a polinização global e local.

No FPA convencional cada pólen representa uma solução candidata. No presente trabalho cada pólen representa as chaves da rede que devem estar abertas.

A Figura 1 mostra o fluxograma do FPA.

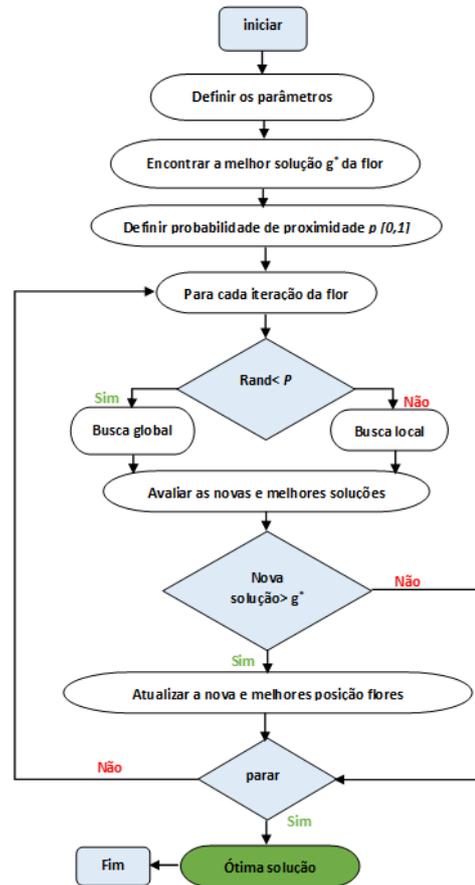


Figura 1. Fluxograma do FPA

2.1 Estratégia de busca

Para haver uma melhor adequação do problema de RSDEE ao algoritmo utilizado algumas condições devem ser consideradas, buscado determinar a dimensão e do espaço de busca do problema, de forma que se respeitem as restrições impostas ao problema. Uma das condições é dada pela Equação (4).

$$n_{os} = n_s - n_b + 1 \quad (4)$$

em que:

- n_{os} = número de chaves que devem ser abertas para que o sistema mantenha-se radial;
- n_s = número de chaves existentes no sistema em estudo;
- n_b = número de nós existentes no sistema em estudo.

A partir de (4) estabelece-se o número de chaves que devem ser abertas para que os sistemas mantenham uma

configuração radial, valor este, coincidente à quantidade de malhas estabelecidas pelo sistema considerando todas as suas chaves fechadas e à dimensão do problema. Para a determinação do conjunto de chaves candidatas à abertura, uma análise de malha é realizada para os sistemas com sua configuração malhada, de forma que se estabeleçam vetores compostos pelas chaves da malha em referência. Os vetores formados são dados por (5).

$$VM_n = [C1_n, C2_n, \dots, CZ_n] \quad (5)$$

Para exemplificar a formação do conjunto de chaves candidatas, toma-se um sistema de 5 nós e 7 linhas, introduzido inicialmente no trabalho de Pereira et al. (2008) e demonstrado na Figura (2).

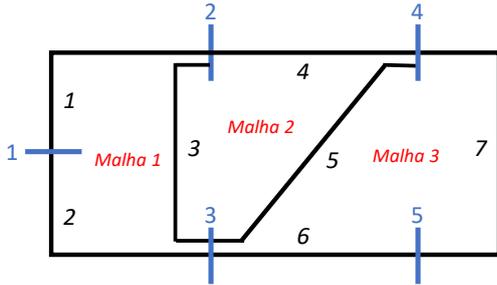


Figura 2. Sistema de 5 nós e 7 linhas

Através de (5), é possível determinar para o sistema em referência, a dimensão do problema e o número de chaves que devem ser abertas para que a condição de radialidade seja respeitada, ou seja, $n_{os} = 7 - 5 + 1 = 3$. Desta forma, abrindo um chave em cada malha, é garantida a radialidade da rede.

Pela análise das malhas da Figura (2), percebe-se que o sistema é composto por três malhas distintas, portanto, o conjunto de chaves candidatas formados para o sistema, pode ser estabelecido por esta análise e por (5), sendo o seguinte: $VM_1 = [1, 2, 3]$, $VM_2 = [3, 4, 5]$ e $VM_3 = [5, 6, 7]$.

Essa análise permite a diminuição do espaço de busca, e conseqüentemente o número de configurações a serem testadas, passando de 128 ou 2^7 , para 27 possibilidades. A partir da modelagem matemática, que será apresentada na próxima seção, e da determinação da dimensão do problema e do espaço de busca, é possível aplicar o FPA. A dimensão da rede da Figura (2) apresenta dimensão 3, Assim o vetor de selução ou pólen X_i apresenta três componentes. Cada componetne pode assumir um valor da malhas (chave). A melhor solução é validada pelo Fluxo de carga (FC).

3. MODELAGEM DO PROBLEMA E FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

Para que o problema de RSDEE seja solucionado de forma coerente, faz-se necessária sua correta modelagem matemática, considerando suas restrições e demais características da rede. Também é de suma importância a escolha do método de FC utilizado para avaliar a rede durante o processo iterativo. Como apresentado, a reconfiguração dos sistemas é realizada através da manobra de chaves seccionadoras e de interligação, que representam os circuitos que conectam dois nós da rede, os quais podem assumir dois estados, ou seja, aberto ou fechado.

A RSDEE visa minimizar as perdas ativas no sistema, e pode ser representada pela Equação (6).

$$\min \quad FOB = \sum_{i=1}^{n_L} R_i I_i^2 \quad (6)$$

onde:

- FOB = perdas nas linhas do sistema
- n_L = número de linhas do sistema
- R_i = resistência no ramo i
- I_i = corrente elétrica que circula no ramo i .

A função objetivo (6) está sujeita às restrições de igualdade e desigualdade a seguir:

Restrições de fluxo de potência As Equações (7) e (8) garante o atendimento de todas as cargas.

$$PG_k - PC_k = V_k \sum_{m \in k} V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) \quad (7)$$

$$QG_k - QC_k = V_k \sum_{m \in k} V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \quad (8)$$

Em que:

- PG_k, QG_k = potência ativa e reativa injetada pelas gerações existentes nas barras k ;
- PC_k, QC_k = potência ativa e reativa das cargas na barra k ;
- V_k, V_m = magnitudes de tensão nodal nas barras k e m , respectivamente;
- G_{km}, B_{km} = parte real e imaginária do elemento km da matriz admitância ($Y = G + jB$);
- θ_{km} = diferença angular entre as barras k e m .

Restrições de magnitude de tensão

Os níveis de tensões admitidos em cada nó devem ser atendidos, como apresentado em (9).

$$V_i^{min} \leq V_i \leq V_i^{max} \quad (9)$$

Radialidade da rede

Os sistemas de distribuição de energia elétrica, normalmente operam de forma radial. Todas as cargas devem permanecer alimentadas, evitando ilhamento de carga. Esta restrição é atendida usando (10).

$$\det(A) = 1 \text{ ou } -1 \quad (10)$$

em que:

- A = matriz de incidência nodal.

Restrição de corrente

Conforme a (11), um valor de corrente acima do limite suportado implicará no aquecimento do condutor, aumentando as perdas na rede por efeito Joule e diminuindo sua vida útil.

$$I_l^{min} \leq I_l \leq I_l^{max} \quad (11)$$

3.1 Curvas de Geração Fotovoltaica e Carga

A curva de GF foi obtida usando os dados de irradiação solar e da temperatura obtidos durante o ano de 2020. As medições foram realizadas no Campus da UFABC de Santo André. Com os dados obtidos foram calculados os valores de GF, utilizando as Equações (12) e (13), disponível em Bueno et al. (2015).

$$F_t^{pv} = \frac{I_{rrt}}{1000} (1 + \text{delta}_t (T_t^{cell} - 25)) \quad (12)$$

$$T_t^{cell} = T_t^A + I_{rrt} \frac{(NOCT - 20)}{800} \quad (13)$$

Em que:

- F_t^{PV} = Geração fotovoltaica no período t;
- I_{rrt} = Irradiância no intervalo t [W/m²];
- delta_t = Constante com valor -0,0046;
- T_t^{cell} = Temperatura na célula no intervalo t (°C);
- T_t^A = Temperatura do ar no intervalo t [°C];
- $NOCT$ = Temperatura de Operação Nominal da Célula (do inglês, Nominal Cell Operating Temperature) [°C].

Ressalta-se que após encontrar GF com (12), todos os valores típicos foram multiplicados pelo valor de GF nominal do Campus da UFABC de Santo André, que corresponde ao valor de 473 kWp.

Na análise da geração mensal foi notado variações tanto na capacidade de geração de energia como na distribuição. A Figura 3 mostra a capacidade de GF de cada mês do ano e a média do ano (curva em vermelho). A curva em vermelho foi utilizada nas análises e o seus dados discretizados hora-hora estão no Apêndice A.

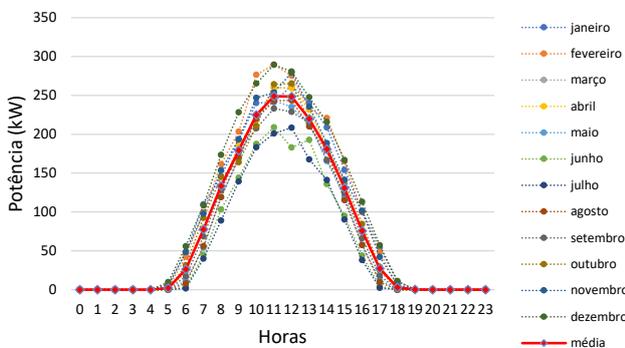


Figura 3. Curvas de geração fotovoltaicas

A Figura 4 apresenta a curva de carga obtida no Eletropaulo (2008) empresa de sistema de distribuição de São

Paulo, que será utilizada nas análises. Para mais detalhes, os dados da curva de carga estão no Apêndice A1.

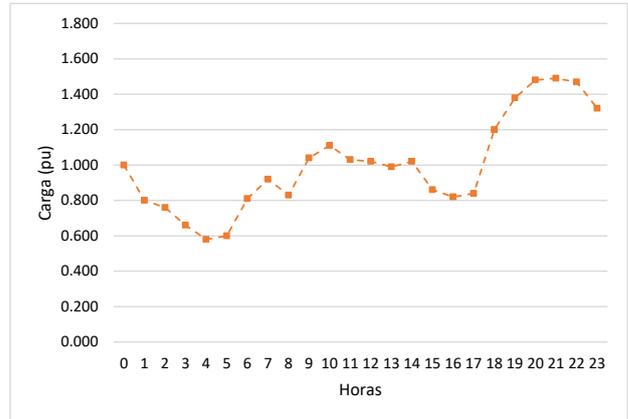


Figura 4. Curva de carga

4. TESTES, RESULTADOS E DISCUSSÕES

O algoritmo proposto foi implementado usando o OCTAVE GU e todas as simulações foram realizadas em um computador Acer com processador Intel®, com sistema operacional de 64 bits.

Os parâmetros utilizados no FPA, obtidos empiricamente, estão apresentados na Tabela (1).

Tabela 1. Parâmetros básico de FPA

Sistema	Flores	máx n° iter	p[0,1]	Rodadas
sistema de 33 nós	70	100	0.75	10

As análises foram realizadas no sistema de distribuição de 33 nós e 37 linhas proposto por Baran and Wu (1989). A Figura 5 apresenta o sistema com a indicação da GF no nó 10. O sistema apresenta carga ativa de 3715 kW e carga reativa 2300 kVAr. O sistema opera com nível de tensão de 12,66 kV, os limites máximos e mínimos são definidos 0,90 p.u e 1,05 pu respectivamente.

4.1 Validação do Algoritmo Proposto

Para validar a técnica do FPA, foi inicialmente considerado o sistema sem reconfiguração, sem GF e sem curva de carga utilizando o sistema de 33 nós e 37 linhas apresentado na Figura 5. O sistema apresenta cinco (5) chaves 33-34-35-36-37 abertas antes da reconfiguração com perdas de 208,430 kW. A solução encontrada pelo FPA aponta para a abertura das chaves 7-9-14-32-37 com um valor de perdas de 138,909 kW. A solução encontrada está de acordo com as referências (Gerez et al., 2019; Silva et al., 2021; Isac Silva et al., 2016; Baran and Wu, 1989). A Figura 6 mostra os resultados encontrados considerando 10 execuções do algoritmo. É possível notar que o FPA obteve 70% de acerto. Essa porcentagem de acerto credêcia o algoritmo para realizar as análises, consierando 10 execuções.

4.2 Análise de 24h do sistema

A carga nominal do sistema foi multiplicada pelos valores em pu da curva de carga da Figura 4. A GF foi adicionada

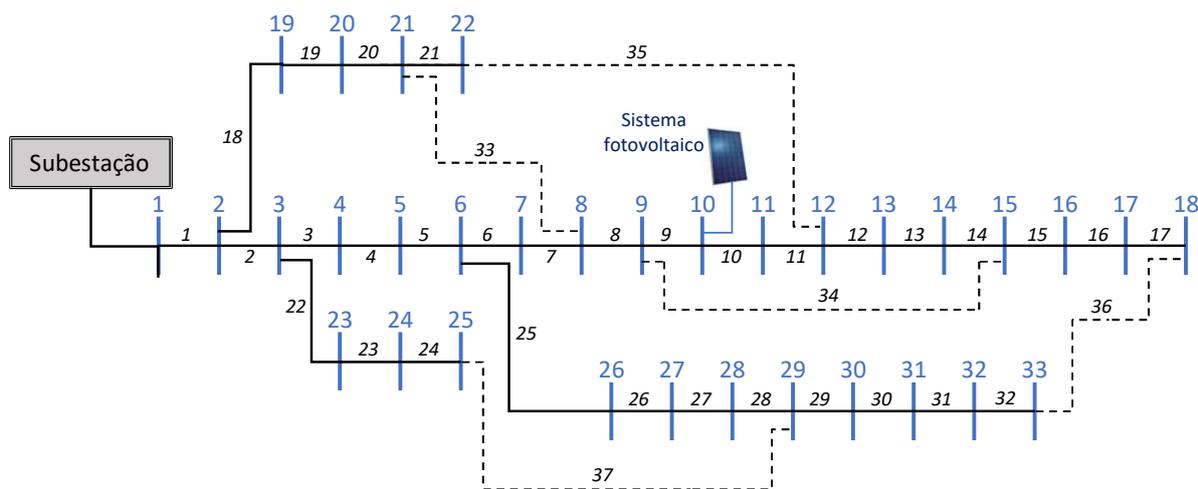


Figura 5. Sistema unifilar de distribuição de 33 barras

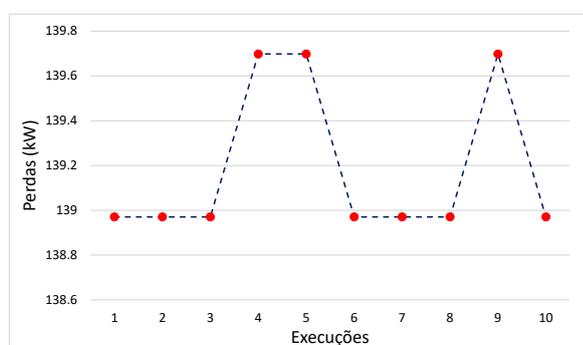


Figura 6. Convergência do FPA para p sistema de 33 nós

na barra 10 do sistema, como mostra a Figura 5. Foram realizadas quatro análises para cada hora do dia. Em todas as análises foi considerada a curva de carga. Segue resumo de cada caso.

Caso A Sistema sem reconfiguração e sem GF;

Caso B Sistema com reconfiguração e sem GF;

Caso C Sistema considerando a reconfiguração do caso B e com GF;

Caso D Sistema com reconfiguração e com GF.

A Tabela 2 mostra os resultados para cada caso.

Os resultados do caso A é apresentado na coluna 2 da Tabela 2. No período considerado as perdas de energia totalizaram 5499,151 kWh. Neste caso o sistema não foi reconfigurado, operando com as chaves 33-34-35-36-37 abertas. Nota-se que na hora 21 ocorreu o pico de perdas do sistema, levando a baixos níveis de tensão. O menor valor de tensão ocorreu na barra 18, sendo 0,91076 pu na hora 21.

Os resultados do caso B estão na coluna 3 da Tabela 2. Neste caso o sistema foi reconfigurado sem considerar a GF. Em todas as horas o algoritmo indicou a abertura das chaves 7-9-14-32-37. Com essa reconfiguração as perdas

diminuíram consideravelmente, totalizando 3628,498 kWh no dia. O pico de perdas ocorreu novamente na hora 21. A menor magnitude de tensão ocorreu na barra 32, com valor de 0,91164 pu. Estes valores também foram verificados nos caso C e D.

Os resultados do caso C estão na coluna 5 da Tabela 2. Neste caso a reconfiguração da coluna 4 foi mantida (do caso B) e acrescentada a GF. Houve alterações nas perdas somente nos horários de pico de GF, diminuindo para 3548,881 kWh as perdas de energia no período. Ressalta-se que alocação de GF na rede pode, em alguns casos, prejudicar o desempenho do sistema.

Os resultados do caso D estão na coluna 5 da Tabela 2. Neste caso, as perdas foram reduzidas. Na última coluna está destacado em vermelho as alterações que ocorreram devido à reconfiguração. Para este caso as perdas de energia no período foi de 3537,851 kWh. É notável perceber poucas diferenças de redução de perdas neste caso D com o C.

A Figura 7 apresenta um resumo das perdas de energia para cada caso durante o período de 24 h. É possível concluir que a reconfiguração é extremamente importante para reduzir as perdas de energia. Outro ponto verificado, comparando o caso C com o D, não há grandes impactos se for mantida uma única reconfiguração de rede, mesmo com GF, o que evita realizar várias manobras de chaves durante o dia.

Vale salientar que no caso B, todas as chaves permaneceram inalteradas durante o dia o que descarta abertura e fechamento de chave e consequente vida dos equipamentos, enquanto caso C e D, nos horários de 7 horas da manhã até às 16 horas da tarde houve alterações das chaves devido a carga gerada pela GF nesses horários e adicionada no sistema.

5. CONCLUSÃO

Neste artigo foi proposta a utilização do FPA para o problema de RSDEE considerando as curvas de carga e GF. As curvas foram obtidas considerando dados da região de Santo André. O FPA foi testado na rede de

Tabela 2. Análise 24h para o sistema de 33 barras para vários casos

hora	Caso A		Caso B		Caso C		Caso D	
	perdas (kW)	perdas (kW)	chaves	perdas (kW)	perdas (kW)	chaves		
00	208,430	138,909	7-9-14-32-37	138,909	138,909	7-9-14-32-37		
01	129,513	87,278	7-9-14-32-37	87,278	87,278	7-9-14-32-37		
02	116,218	78,477	7-9-14-32-37	78,477	78,477	7-9-14-32-37		
03	86,421	58.659	7-9-14-32-37	58.659	58.659	7-9-14-32-37		
04	66,009	44,983	7-9-14-32-37	44,983	44,983	7-9-14-32-37		
05	70,833	48,223	7-9-14-32-37	48,158	48,158	7-9-14-32-37		
06	132,962	89,555	7-9-14-32-37	88,546	88,546	7-9-14-32-37		
07	174,311	116,701	7-9-14-32-37	113,277	113,135	7-10-14-32-37		
08	140,014	94,204	7-9-14-32-37	89,154	88,529	7-10-14-32-37		
09	226,817	150,809	7-9-14-32-37	142,166	141.028	7-10-14-32-37		
10	261,191	172,938	7-9-14-32-37	161,466	159,794	7-10-14-32-37		
11	222,136	147,784	7-9-14-32-37	136,467	134,442	7-10-14-31-37		
12	217,511	144,792	7-9-14-32-37	133,701	131,711	7-10-14-31-37		
13	203,974	136,017	7-9-14-32-37	126,323	124,858	7-10-14-32-37		
14	217,511	144,792	7-9-14-32-37	136,276	135,134	7-10-14-32-37		
15	150,976	101,414	7-9-14-32-37	96,245	95,632	7-10-14-32-37		
16	136,463	91,864	7-9-14-32-37	88,927	88,761	7-10-14-32-37		
17	143,616	96,575	7-9-14-32-37	95,476	95,476	7-9-14-32-37		
18	309,640	203,874	7-9-14-32-37	203,695	203,695-	7-9-14-32-37		
19	421,809	274,439	7-9-14-32-37	274,439	274,436	7-9-14-32-37		
20	493,558	318,85	7-9-14-32-37	318,853	318,853	7-9-14-32-37		
21	501,125	323,506	7-9-14-32-37	323,506	323,506	7-9-14-32-37		
22	486,064	314,239	7-9-14-32-37	314,239	314,239	7-9-14-32-37		
23	382,068	249,601	7-9-14-32-37	249,601	249,601	7-9-14-32-37		
Total (kWh)	5499,151	3628,498	-	3548,831	3537,851	-		

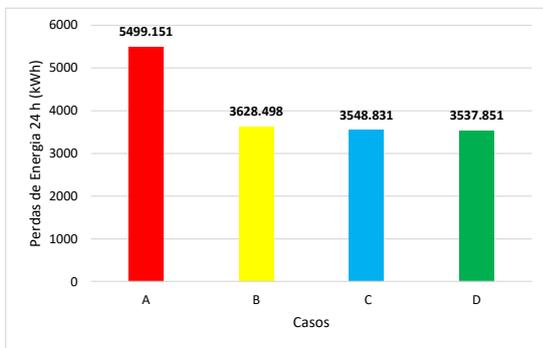


Figura 7. Perdas de energia para os casos analisados

distribuição de 33 nós e 37 linhas. Para mitigar a reconfiguração associada a GF, foram analisados vários casos, considerando ou não a reconfiguração e GF. A técnica FPA utilizada, a partir da metodologia proposta, gerou conjuntos de configurações com valores de perdas menores dependendo dos casos analisados, mostrando sua eficácia para implementação em sistemas de grandes dimensões. com resultados encontrados e esperados com FPA, percebeu-se a importância do método de reconfiguração conforme os resultados apresentados para casos B e D, os quais são aplicados para reconfiguração. No entanto, observou-se também que a barra escolhida para GF não proporcionou grandes reduções nas perdas, assim, recomenda-se a utilização do método de alocação e dimensionamento de GD no sistema de distribuição, buscando determinar melhores locais para instalação de GF.

Conclui-se que a RSDEE é de suma importância, sobretudo para empresas de sistema de distribuição, pois, além de garantir a confiabilidade no fornecimento de energia elétrica aos consumidores também diminuem o custo de operação.

Para trabalhos futuros, será analisado o sistema real de Santo André com as GF dos Campi da UFABC.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao Universidade Federal do ABC - UFABC; Ao Centro de Engenharia, Modelagem e Ciência Sociais aplicada - CECS; Ao Empresa Enel Distribuição de São Paulo, que tem financiado o Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento, intitulado “Potencialidade da Geração Solar Fotovoltaica para Melhoria no Fornecimento de Energia Elétrica nas Redes de Distribuição – Chamada ANEEL de Projeto Prioritário e Estratégico N°001/2016, código ANEEL 00390-1083-2020”sobretudo o Projeto UFABC/SOLAR e Capes.

REFERÊNCIAS

- Baran, M. and Wu, F. (1989). Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 4(2), 1401–1407. doi:10.1109/61.25627.
- Bueno, S.M., Munoz, J.I., and Contreras, J. (2015). A stochastic investment model for renewable generation in distribution systems. *EEE Transactions on Sustainable Energy*, 6, 1466–1474.

- Carvalho, Deborah Martins de; Coelho, A.C.C.M.R.S.d.S.C.K.R. (2017). Acordo de paris: Uma análise descritiva. In *São Paulo: Blucher*, 1260–1269. doi:10.5151/xvенеeamb-127.
- Eletropaulo (2008). Nt-2.018: Cálculo de demanda rede para acréscimo de novas cargas na rede de distribuição de baixa tensão. In *Chemical Carcinogenesis*. AES. URL www.eneldistribuiçaoosp.com.br/Padroes/\%20Normas\%20Técnicas\%20Espec/NT-2018.pdf.
- EPE (2021). Plano decenal de expansão de energia 2030. URL "https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-490/PDE\%202030_RevisaoPosCP_rv2.pdf".
- Gerez, C., Silva, L.I., Belati, E.A., Sguarezi Filho, A.J., and Costa, E.C.M. (2019). Distribution network reconfiguration using selective firefly algorithm and a load flow analysis criterion for reducing the search space. *IEEE Access*, 7, 67874–67888. doi:10.1109/ACCESS.2019.2918480.
- Ghasemi, S. and Moshtagh, J. (2015). Radial distribution systems reconfiguration considering power losses cost and damage cost due to power supply interruption of consumers. *International Journal on Electrical Engineering and Informatics*, 5, 297–315.
- Gomes, Y.R., Belati, E.A., and Vargas, R. (2021). Flower pollination algorithm for distribution system reconfiguration problem. *IEEE Access*, 1–5. doi:10.1109/ISGTLatinAmerica52371.2021.9543013.
- Isac Silva, L., Antonio Belati, E., and Chaves Silva Junior, I. (2016). Heuristic algorithm for electrical distribution systems reconfiguration based on firefly movement equation. *IEEE Latin America Transactions*, 14(2), 752–758. doi:10.1109/TLA.2016.7437219.
- Jose, D., Belati, E.A., and Werley, E. (2020). Fpaes : A hybrid approach for the optimal placement distribution grids. *energies*, 13, 2–18.
- Merlin, A. and Back, H. (1975). Search for a minimal-loss operating spanning tree configuration in an urban power distribution system. In *Proceedings 5th Power System Computation Conference (PSCC)*, 1–5.
- Neves, P.S. (2017). *Expansão estática de sistemas de transmissão de energia elétrica via FPA*. Master's thesis, UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA, <https://repositorio.ufjf.br/jspui/handle/ufjf/6042>.
- Nguyen, T.T., Truong, A.V., and Phung, T.A. (2016). A novel method based on adaptive cuckoo search for optimal network reconfiguration and distributed generation allocation in distribution network. *International Journal of Electrical Power Energy Systems*, 78, 801–815. doi:https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2015.12.030. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061515005827>.
- Peponis, G. and Papadopoulos, M. (1995). Reconfiguration of radial distribution networks: application of heuristic methods on large-scale networks. *IEEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, 142(6), 631–638.
- Pereira, F.S., Vittori, K., and da Costa, G.R.M. (2008). Ant colony based method for reconfiguration of power distribution system to reduce losses. In *2008 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America*, 1–5. doi:10.1109/TDC-LA.2008.4641831.
- Salman S.K, S.B.e.K.M. (2019). Enhancing radial distribution network performance by optimal reconfiguration with pso algorithm. *Multi-Conference on Systems*, 180–186.
- Silva, L.I., Belati, E.A., Gerez, C., and Junior, I.C.S. (2021). Reduced search space combined with particle swarm optimization for distribution system reconfiguration. *Electr Eng*, 1127–1139. doi:https://doi.org/10.1007/s00202-020-01150-z.
- Song, Y., Zheng, Y., Liu, T., Lei, S., and Hill, D.J. (2020). A new formulation of distribution network reconfiguration for reducing the voltage volatility induced by distributed generation. *IEEE Transactions on Power Systems*, 35(1), 496–507. doi:10.1109/TPWRS.2019.2926317.
- Tran, T.V., Truong, B.H., Nguyen, T.P., Nguyen, T.A., Duong, T.L., and Vo, D.N. (2021). Reconfiguration of distribution networks with distributed generations using an improved neural network algorithm. *IEEE Access*, 9, 165618–165647. doi:10.1109/ACCESS.2021.3134872.
- Yang, X. (2012). Flower pollination algorithm for global optimization. *springer-verlag*, 7445, 240–249.
- Zhao, T., Chen, B., Zhao, S., Wang, J., and Lu, X. (2020). A flexible operation of distributed generation in distribution networks with dynamic boundaries. volume 35, 125–247. Academic Press.

Tabela .1. A1. GF média anual da UFABC típica com curva de carga

horas	GF em kW	Curva de carga
0	0	1
1	0	0,8
2	0	0,76
3	0	0,66
4	0	0,58
5	2,0973	0,6
6	24,0724	0,81
7	73,7686	0,92
8	129,4526	0,83
9	174,3019	1,04
10	220,6952	1,11
11	244,8880	1,03
12	242,6548	1,02
13	215,4639	0,99
14	176,2776	1,02
15	126,5451	0,86
16	72,2692	0,82
17	25,2116	0,84
18	2,6965	1,2
19	0,0394	1,38
20	0	1,48
21	0	1,49
22	0	1,47
23	0	1,32

Obs: A curva de carga foi obtido no documento de Empresa de sistema de distribuição de Eletropaulo, pode ser encontrado (Eletropaulo, 2008)