

# METODOLOGIA DE PLANEJAMENTO MULTISTÁGIOS DA EXPANSÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA USANDO O ALGORITMO DRAGONFLY

## *ELECTRICAL POWER DISTRIBUTION SYSTEMS MULTI-STAGE EXPANSION PLANNING METHODOLOGY USING DRAGONFLY ALGORITHM*

Fernando Calenzani Muller<sup>1</sup> 

Clainer Bravin Donadel<sup>2</sup> 

**Resumo:** O sistema de energia elétrica está em constante expansão para atender à crescente demanda por energia elétrica dos consumidores. Neste contexto, reforços nas redes de distribuição podem ser necessários, tais como a substituição de condutores que excederam sua capacidade dentro do horizonte de planejamento considerado, ou até mesmo a alteração na configuração dos alimentadores, por meio da alteração do *status* de cada chave presente na rede, dentre outras possibilidades. Desta forma, este artigo propõe uma nova metodologia de planejamento da expansão de sistemas de distribuição de energia elétrica, formulado como um problema de otimização não-linear, e solucionado por meio do algoritmo heurístico *Dragonfly* (libélula), integrando *Python* (coleta de dados, manipulação das redes de distribuição de energia elétrica e apresentação dos resultados) e *OpenDSS*<sup>®</sup> (cálculo de fluxo de potência). O algoritmo *Dragonfly* foi responsável pela reconfiguração do alimentador, visando a minimização dos custos de expansão e de perdas técnicas. A metodologia proposta foi aplicada no alimentador de testes IEEE 123 barras adaptado, que possui diversas chaves, reguladores de tensão e transformadores. A aplicação da metodologia proposta permitiu uma redução de mais de 22% nos custos de expansão, utilizando 30 libélulas nas simulações, mostrando a efetividade do algoritmo proposto quando aplicado em sistemas de distribuição de energia elétrica.

**Palavras-chave:** Algoritmo de otimização *Dragonfly*. Reconfiguração de alimentadores. Planejamento de expansão multistágios. Sistemas de distribuição de energia.

**Abstract:** The electric power system is in constant expansion, to supply the increasing demand for electricity of consumers. In this context, the distribution systems expansion planning has the role of determining the guidelines of distribution network expansion. Therefore, reinforcements in the feeder are necessary such as replacement of conductors (that exceeded their capacity), within the established planning horizon, changes in the feeder configuration through the change of switches status, among other essential actions for continuity and quality of energy delivered to the customer. This paper proposes a distribution systems planning methodology formulated as a nonlinear optimization problem, which was solved through the Dragonfly Optimization Algorithm heuristic, developed from the integration between Python (data collection, feeder modification and results display) and OpenDSS<sup>®</sup> (power flow calculation). Dragonfly Algorithm is responsible for the feeder reconfiguration, aiming to minimize expansion costs and technical losses. The proposed methodology was tested on the adapted IEEE 123 buses, which is a test network with over 123

---

<sup>1</sup> Graduação em Engenharia Elétrica, aluno egresso do Instituto Federal do Espírito Santo (Ifes), fernandocalenzani@gmail.com.

<sup>2</sup> Doutorado em Engenharia Elétrica, Instituto Federal do Espírito Santo (Ifes), cdonadel@ifes.edu.br.

buses, multiple switches, voltage regulators and transformers. Finally, the proposed methodology brought a 22% savings from the original expansion plan, simulated with Dragonfly Algorithm, using 30 dragonflies, showing the effectiveness of the proposed algorithm when applied to power distribution systems.

**Keywords:** Dragonfly optimization algorithm. Feeder reconfiguration. Multistage expansion planning. Power distribution systems.

# 1 INTRODUÇÃO

O sistema elétrico de potência (SEP) é responsável pelo fornecimento da energia elétrica aos consumidores no instante solicitado, com qualidade e disponibilidade (KAGAN *et al.*, 2005). De acordo com PÁDUA (2005), o planejamento da expansão do sistema elétrico de distribuição de energia elétrica (PESD) consiste em encontrar uma configuração ótima dos alimentadores de modo a atender a demanda de energia elétrica futura, com qualidade, confiabilidade e com menor custo possível. Segundo BRASIL (2021a), o PESD deve conter a previsão da demanda, a caracterização da carga e do sistema elétrico, os critérios de estudo para definir a configuração dos alimentadores, o horizonte de planejamento, o plano de obras de expansão de capacidade e a relação de obras realizadas. Ainda, é necessário especificar os elementos que devem ser instalados e revitalizados para o atendimento da demanda planejada, obedecendo ao critério de custo mínimo global.

Atualmente, os estudos da expansão de capacidade do sistema de distribuição de energia elétrica são complexos e importantes para evitar problemas futuros com a rede. Diante disso, aproximar o modelo construído ao sistema real é de suma importância para garantir que os investimentos realizados sejam considerados prudentes. Adicionalmente, parte dos problemas de planejamento são solucionados através de heurísticas, devido a sua complexidade, que conseguem entregar uma boa solução para a configuração sem a necessidade de testar todas as possibilidades. Na literatura atual são utilizados diversos métodos heurísticos para solução destes problemas: *Genetic Algorithm* (GA), *Particle Swarm Optimization* (PSO), *Ant Colony* (AC), *Evolutionary Algorithm* (EA), *Tabu Search* (TS), *Artificial Bee Colony* (ABC), *Gravitational Search Algorithm* (GSA), dentre outros (BENITEZ CATTANI, 2020; DAVOODI *et al.*, 2022; GRISALES *et al.*, 2018; MAZHARI *et al.*, 2015; NASRI *et al.*, 2022; VAHIDINASAB *et al.*, 2020; ZHOU *et al.*, 2020).

O *Dragonfly Algorithm* é definido como heurística recente na literatura e vem sendo utilizada na solução de diversos problemas de otimização (BO *et al.*, 2019; CHEN *et al.*, 2020; LI *et al.*, 2020; NASHAAT *et al.*, 2020; PRASATH e KUMANAN, 2021; ZHOU *et al.*, 2022). A técnica se baseia no comportamento

social de um enxame de libélulas, que trabalham coletivamente para encontrar uma solução ótima dentro de um espaço de busca, em que cada libélula caminha para o ponto de mínimo global. Entretanto, nenhum dos trabalhos pesquisados utilizou essa heurística aplicada ao planejamento da expansão de capacidade do sistema de distribuição de energia elétrica. Assim, este trabalho apresenta uma metodologia de planejamento da expansão de capacidade multiestágios de sistemas de distribuição de energia elétrica utilizando o *Dragonfly Algorithm*, buscando minimizar os custos da expansão de capacidade e de perdas técnicas.

O restante deste artigo está dividido da seguinte forma: na Seção 2 é apresentada e detalhada a metodologia proposta; na Seção 3 são apresentados os resultados aplicados a um estudo de caso, bem como a avaliação dos resultados; por fim, na Seção 4, são apresentadas as conclusões deste trabalho.

## **2 METODOLOGIA**

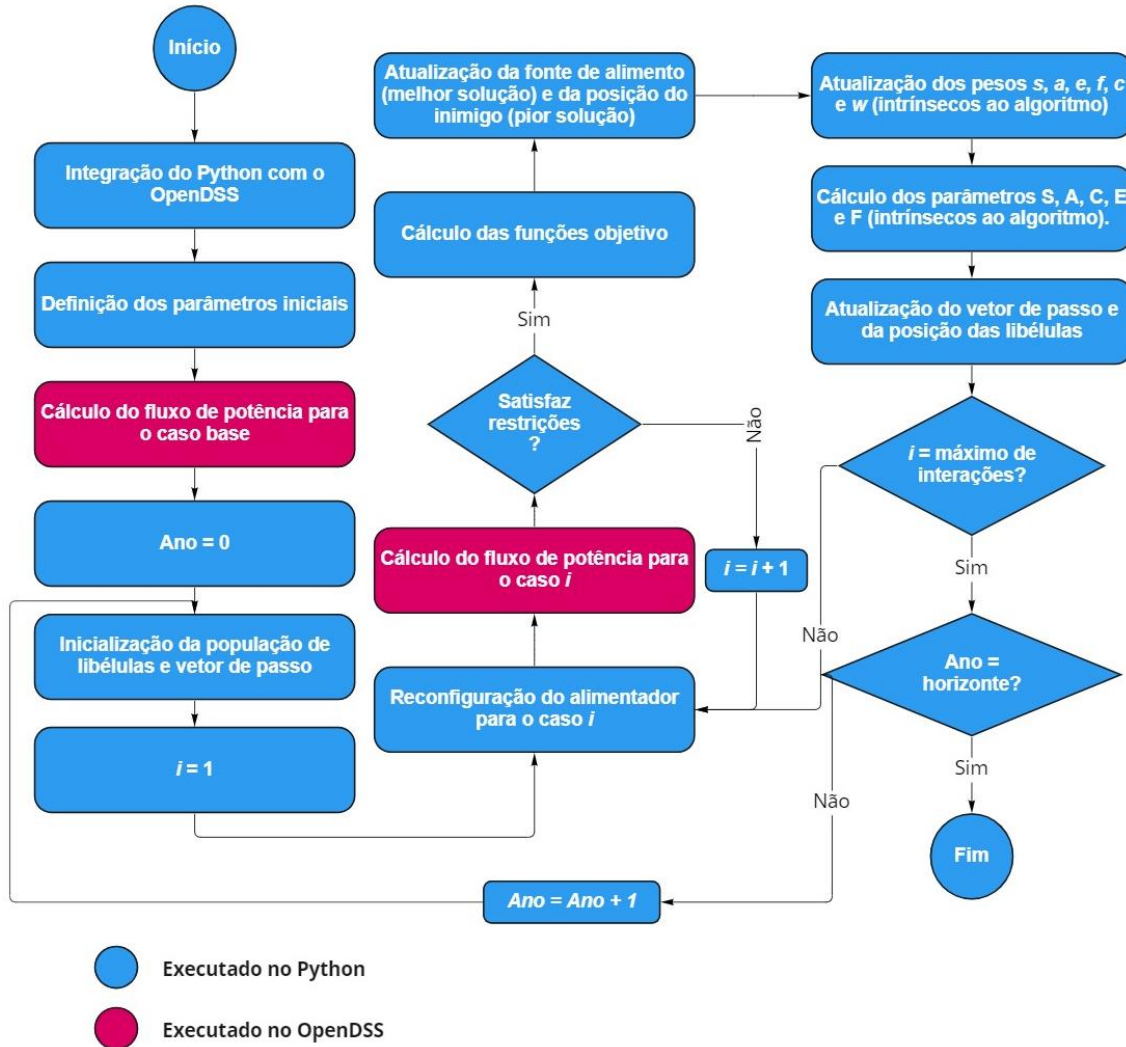
### **2.1 Informações gerais sobre a proposta**

A presente proposta consiste em associar reconfiguração das chaves presentes no circuito alimentador com possibilidade de substituição de condutores em sobrecarga, bem como a construção de novas linhas em paralelo as já existentes. A reconfiguração das chaves é realizada por meio da aplicação do algoritmo *Dragonfly*. A substituição de condutores em sobrecarga e a construção de novas linhas em paralelo é feita a partir dos valores apurados de carregamento percentual de cada trecho da rede e em informações sobre condutores disponíveis. Todo o processo é executado ano a ano para todo o horizonte de planejamento. A Figura 1 apresenta o fluxograma do processo.

A ferramenta utilizada para o cálculo do fluxo de potência foi o *OpenDSS*<sup>®</sup>, *software* livre desenvolvido pela EPRI (*Electric Power Research Institute*) em 1997 para cálculo do fluxo de potência em sistemas de distribuição de energia elétrica. Já para a manipulação, controle, edição dos parâmetros e exibição dos resultados obtidos, foi utilizado o *Python*, integrado ao *OpenDSS*<sup>®</sup>. O computador utilizado para simular o algoritmo proposto foi um notebook da fabricante Dell, com processador Intel i5, 8 GB de memória RAM, sistema

operacional Microsoft Windows 10 Professional. A metodologia foi testada no alimentador IEEE 123 barras adaptado (foram adicionadas 2 chaves para ampliar as possibilidades de configuração do alimentador).

Figura 1 - Fluxograma do algoritmo proposto.



Fonte: Dos autores.

## 2.2 Definição do plano de expansão de capacidade

O horizonte de planejamento adotado foi de 5 anos, com execução de obras anualmente. Foi considerado um aumento anual da carga de 7%, de forma que force o alimentador ao seu limite de carga. Os valores de tensão nos barramentos foram considerados adequados quando contidos na faixa entre

0,93 pu a 1,05 pu, utilizando como referência a regulamentação para redes de média tensão determinada pela Agência Nacional de Energia Elétrica (BRASIL, 2021b). Os valores de carregamento percentual das linhas foram considerados adequados quando inferiores ou iguais a 66% da capacidade do condutor em todo o horizonte de planejamento, obtido a partir da aplicação do critério de circuitos de socorro apresentado em KAGAN *et al.* (2005). As linhas com carregamento maior que 66% foram substituídas por novas linhas, de maior capacidade, observando a disponibilidade de condutores mostrada na Tabela 1. Na Tabela 1, as colunas Tipo e Nome representam o identificador único do condutor, numerados sequencialmente entre 1 e 7; as colunas R e X apresentam os valores de resistência e reatância do condutor/formação, em  $\Omega/\text{km}$ , respectivamente; e a coluna Capacidade apresenta a capacidade de condução de corrente do condutor, em A. Caso o carregamento de alguma linha ultrapassasse o valor máximo da capacidade dos condutores disponíveis na Tabela 1, novas linhas foram adicionadas em paralelo às antigas, sendo escolhidas de acordo com o custo de instalação (PINTO, 2018). Para cada trecho em sobrecarga, todas as fases deste trecho foram substituídas.

A Tabela 2 apresenta os custos de recondutoramento ou construção de novas linhas em paralelo à existente. Na Tabela 2, a primeira coluna de dados indica o condutor atualmente instalado na rede de distribuição de energia elétrica, variando entre 0 (ausência de rede de distribuição de energia elétrica) e 6 (condutor de maior capacidade para o qual poderia ocorrer recondutoramento); a primeira linha de dados indica o condutor alvo, que será instalado quando da construção de uma nova rede de distribuição de energia elétrica ou quando do recondutoramento da rede existente, variando entre 1 e 7 (valores mínimo e máximo obtidos a partir da Tabela 1). Os valores das demais células indicam o custo de construção ou recondutoramento, em  $10^3 \text{ R\$/km}$ . Por exemplo, para se obter o custo de construção de uma rede de distribuição de energia elétrica em condutor AA4, deve-se buscar a intersecção da primeira linha com a quarta coluna, resultando em R\$ 87.400/km. Células sem valores indicam que a alternativa de recondutoramento em questão não é viável, pois reduziria ou apenas manteria a capacidade de condução da rede. Os custos de

recondutoramento e construção, informados na Tabela 2, foram ajustados de acordo com parâmetro IPCA-E do IBGE, de janeiro de 2021, cujo índice de correção é 1,74883940 de acordo com Banco Central do Brasil (BACEN, 2021).

**Tabela 1** - Características dos condutores utilizados

Tipo	Nome	R (ohm/km)	X (ohm/km)	Capacidade (A)
1	AA1	0,3655	0,2520	150
2	AA2	0,2359	0,2402	250
3	AA3	0,1827	0,1260	350
4	AA4	0,1460	0,1233	400
5	AA5	0,1180	0,1201	500
6	AA6	0,0966	0,1201	600
7	AA7	0,0900	0,3457	790

Fonte: Adaptado de RODRIGUES *et al.* (2011).

**Tabela 2** - Custos de Construção e Recondutoramento dos Condutores utilizados

		Custo (10 <sup>3</sup> R\$/km)						
		Conductor alvo						
		1	2	3	4	5	6	7
Conductor atual	0	35,0	52,5	73,5	87,4	117,2	148,7	213,4
	1	-	40,2	64,7	70,0	101,4	132,9	194,9
	2	-	-	52,5	61,2	87,4	115,4	176,4
	3	-	-	-	50,7	75,2	92,7	157,9
	4	-	-	-	-	61,2	78,7	139,4
	5	-	-	-	-	-	66,5	120,9
	6	-	-	-	-	-	-	102,5

Fonte: Adaptado de RODRIGUES *et al.* (2011).

### 2.3 Formulação das funções objetivo e das restrições

Minimização de custos: relativo aos custos de investimento para o recondutoramento/construção de novas linhas do alimentador – Equação (1).

$$C^{Total} = \sum_{t=0}^T C_t^{R,C} \quad (1)$$

onde:

$C^{Total}$ : custo total do horizonte de planejamento, em R\$;

$C_t^{R,C}$ : custo de expansão de capacidade devido à substituição de condutores ou construção de novas linhas, em R\$;

$T$ : horizonte de planejamento, em anos;

$t$ : período do horizonte de planejamento, em anos.

Os custos com recondução ou construção de novas linhas ( $C_t^{R,C}$ ) é calculado por meio da Equação (2):

$$C_t^{R,C} = \sum_{i=1}^{N_{linhas}} \alpha_i \cdot l_i \cdot C_i^{COND} \cdot \left[ (1 - P_{Custo Fixo}) \cdot \frac{n_i}{3} + P_{Custo Fixo} \right] \quad (2)$$

onde:

$C_t^{R,C}$ : custo de expansão de capacidade devido à substituição de condutores ou construção de novas das linhas;

$N_{linhas}$ : número de total de linhas do alimentador;

$l_i$ : comprimento da  $i$ -ésima linha;

$n_i$ : número de fases da  $i$ -ésima linha;

$\alpha_i$ : 1 caso a linha exceda sua capacidade; 0, caso contrário;

$C_i^{COND}$ : custo por quilômetro do condutor selecionado;

$P_{Custo Fixo}$ : porcentagem que representa o custo fixo de recondução.

Minimização de perdas técnicas: as Equações (3) e (4) definem o cálculo das perdas técnicas em um trecho do alimentador.

$$\Delta P = \sum_{i=1}^n \Delta P_i \quad (3)$$

onde:

$\Delta P$ : perdas de potência do alimentador;

$\Delta P_i$ : perdas de potência no trecho  $i$  do alimentador.

$$\Delta P_i = R_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} \quad (4)$$

onde:

$R_i$ : resistência no trecho  $i$ ;

$V_i$ : tensão da barra final do trecho do trecho  $i$ ;

$P_i$ : fluxo de potência ativa no trecho  $i$  do alimentador;

$Q_i$ : fluxo de potência reativa no trecho  $i$  do alimentador.

Escolha da melhor solução: o problema proposto neste trabalho é solucionado como função multiobjetivo, com duas funções objetivo, minimização de custos da expansão de capacidade e minimização das perdas técnicas. Para selecionar a melhor solução do espaço de soluções dos objetivos foi utilizado o método das  $\varepsilon$ -restrições ( $\varepsilon$ -Constraint), definido em COSSI (2008). A técnica considera um objetivo principal, mantendo os demais objetivos como funções constantes, limitando o espaço de soluções. No presente caso, mantém-se como função principal a minimização de custos, fixando a função objetivo minimização de perdas técnicas. A formulação do problema proposto é apresentada na Equação (5), sendo  $f_1$  a função com maior prioridade de minimização.

$$\begin{aligned} \min y = f(x) &= \{f_1(x)\} \\ \text{s. a } f_i(x) &\leq \varepsilon_i \\ i &= 2, \dots, k \\ x &\in S^* \end{aligned} \quad (5)$$

onde:

$\varepsilon_i$ : limite superior do objetivo  $i$ ,  $i = 2, \dots, k$ ;

$f_i(x)$ : funções objetivo com menor relevância que  $f_1(x)$ .

Restrições do problema: para produção de soluções factíveis que representam o problema é necessário um conjunto de restrições relativas ao sistema estudado. As restrições relacionadas ao cálculo do fluxo de potência são caracterizadas pelas Equações (6)-(15). Já as restrições relacionadas ao algoritmo *Dragonfly* são expressas pelas Equações (16)-(17).

$$P_k^t(V, \delta) = V_k^t \sum_{m=1}^K V_m^t (G_{km} \cos \delta_{km}^t + B_{km} \sin \delta_{km}^t) \quad (6)$$

$$Q_k^t(V, \delta) = V_k^t \sum_{m=1}^K V_m^t (G_{km} \sin \delta_{km}^t - B_{km} \cos \delta_{km}^t) \quad (7)$$

$$P_k^t(V, \delta) = P_{gk}^t - P_{dk}^t + \Delta P_{dk}^t \quad (8)$$

$$Q_k^t(V, \delta) + Q_{sh,k}^t = Q_{gk}^t - Q_{dk}^t + \Delta Q_{dk}^t \quad (9)$$

$$S_{ij}^t = \sqrt{(P_{ij}^t)^2 + (Q_{ij}^t)^2} \quad (10)$$

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

$$S_{Lij}^{min} \leq S_{Lij}^t \leq S_{Lij}^{max} \quad (12)$$

$$P_{gk}^{min} \leq P_{gk}^t \leq P_{gk}^{max} \quad (13)$$

$$Q_{gk}^{min} \leq Q_{gk}^t \leq Q_{gk}^{max} \quad (14)$$

$$S_{dk}^{min} \leq S_{dk}^t \leq S_{dk}^{max} \quad (15)$$

$$X_i^{min} \leq X_i^j \leq X_i^{max} \quad (16)$$

$$SW_i = \rho, \forall \rho = 0 \text{ ou } 1 \quad (17)$$

onde:

$S_{Lij}^t$ : potência aparente que flui na linha  $L_{ij}$  no período  $t$ ;

$S_{Lij}^{max}$ : potência aparente máxima que flui na linha  $L_{ij}$  no período  $t$ ;

$S_{Lij}^{min}$ : potência aparente mínima que flui na linha  $L_{ij}$  no período  $t$ ;

$V_k^{min}$ : mínima tensão na barra  $k$ ;

$V_k^{max}$ : máxima tensão na barra  $k$ ;

$V_k^t$ : tensão na barra  $k$ , no período  $t$ ;

$P_{gk}^{min}$ : mínima potência ativa injetada na barra  $k$ ;

$P_{gk}^{max}$ : máxima potência ativa injetada na barra  $k$ ;

$P_{gk}^t$ : potência ativa injetada na barra  $k$ , no período  $t$ ;

$Q_{gk}^{min}$ : mínima potência reativa injetada na barra  $k$ ;

$Q_{gk}^{max}$ : máxima potência reativa injetada na barra  $k$ ;

$Q_{gk}^t$ : potência reativa injetada na barra  $k$ , no período  $t$ ;

$P_{ij}^t$ : potência ativa que flui na linha  $L_{ij}$ , no período  $t$ ;

$Q_{ij}^t$ : potência reativa que flui na linha  $L_{ij}$ , no período  $t$ ;  
 $P_k^t(V, \delta)$ : injeção resultante de potência ativa em  $k$ , no período  $t$ ;  
 $Q_k^t(V, \delta)$ : injeção resultante de potência reativa em  $k$ , no período  $t$ ;  
 $\delta_{km}^t$ : ângulo entre as barras  $k$  e  $m$ , no período  $t$ ;  
 $G_{km}$ : condutância série entre as barras  $k$  e  $m$ , no período  $t$ ;  
 $B_{km}$ : susceptância série entre as barras  $k$  e  $m$ , no período  $t$ ;  
 $P_{dk}^t$ : potência ativa da carga na barra  $k$ , no período  $t$ ;  
 $\Delta P_{dk}^t$ : corte de carga na potência ativa da carga na barra  $k$ , no período  $t$ ;  
 $Q_{dk}^t$ : potência reativa da carga na barra  $k$ , no período  $t$ ;  
 $\Delta Q_{dk}^t$ : corte de carga na potência reativa da carga na barra  $k$ , no período  $t$ ;  
 $Q_{sh,k}^t$ : potência reativa shunt na barra  $k$ , no período  $t$ ;  
 $S_{dk}^{min}$ : mínima potência aparente admitida na carga na barra  $k$ ;  
 $S_{dk}^{max}$ : máxima potência aparente admitida na carga na barra  $k$ ;  
 $S_{dk}^t$ : potência aparente da carga na barra  $k$ , no período  $t$ ;  
 $X_i^{min}$ : mínimo valor de posição aceitável da libélula  $i$  no espaço de solução;  
 $X_i^{max}$ : máximo valor da posição aceitável da libélula  $i$  no espaço de solução;  
 $X_i^j$ :  $j$  representa o enxame pertencente a libélula,  $i$  representa a libélula pertencente ao enxame,  $X_i^j$  representa a posição da libélula no espaço de busca;  
 $SW_i$ : estado da chave  $i$ , assumindo  $\rho = 0$  para normalmente aberta (NA) ou  $\rho = 1$  para o estado normalmente fechada (NF).

As restrições das Equações (6)-(10) asseguram o equilíbrio entre geração, carga e fluxo de potência das linhas de distribuição. Já as restrições das Equações (11)-(15) garantem que os limites de tensão e potência nas linhas sejam respeitados no cálculo do fluxo de potência. Por fim, as restrições das Equações (16)-(17) são alusivas ao método heurístico aplicado. A restrição da Equação (15) garante que todas as cargas instaladas sejam atendidas, certificando que a potência entregue esteja dentro do limite imposto. A Equação (16) certifica que o vetor posição das libélulas, denominado  $X_i^j$ , mantenha-se dentro de um limite determinado. Finalmente, a Equação (17) certifica que  $X_i^j$

seja binário após sua transformação através de uma Sigmóide (transformação do vetor  $X_i^j$  para um vetor binário).

## 2.4 Algoritmo *Dragonfly*

O *Dragonfly* é definido como método heurístico recente na literatura, baseando-se no comportamento social de um enxame de libélulas, trabalhando de forma coletiva para encontrar uma solução ótima dentro de um espaço de busca.

No estudo de reconfiguração de uma rede o estado das chaves é determinado como a variável de decisão do problema. Dessa forma, o estado das chaves (aberto ou fechado), impacta nas grandezas de interesse, como: tensão nas barras, corrente das linhas, perdas técnicas e potência da subestação. Logo, o algoritmo *Dragonfly* determinará qual é a configuração das chaves presentes no alimentador de forma que minimize os custos da expansão de capacidade e as perdas técnicas.

Geração aleatória da população inicial de libélulas: a parte inicial do algoritmo é a geração da população inicial e do vetor de passo. Para isto, foi considerado inicialmente que as libélulas estão dispostas de forma aleatória no espaço de busca. Os valores de posição das libélulas são escolhidos de forma aleatória em um intervalo de  $-X_{min} \leq X_i^j \leq X_{max}$ , em que cada posição representa o estado da chave  $SW_i$ , pertencente a libélula  $X_i^j$ , recebendo valores aleatórios dentro do intervalo determinado. Este processo é feito para todas as  $N_{libélulas}$  dos 16 enxames, equivalente as 16 chaves do alimentador, que podem ser ativadas ou desativadas.

Complementarmente, nesta etapa também é executada a inicialização do vetor velocidade das libélulas, que recebe valores aleatórios dentro de um intervalo  $X_{min}/10 \leq \Delta X_i^j \leq X_{max}/10$ .

Adicionalmente, as posições das libélulas foram limitadas entre -5 e +5, facilitando a funcionalidade do algoritmo. As restrições de posição máxima ( $X_{max} = +5$ ) e posição mínima ( $X_{min} = -5$ ) foram escolhidas com base nas variações do vetor de passo e de forma a facilitar a convergência do algoritmo.

Logo, o vetor de passo assume valores menores do que |5|, para condicionar a troca de estados das chaves.

Como o *Dragonfly* foi inicialmente elaborado para solucionar problemas com variáveis contínuas, e o objetivo deste trabalho é determinar o estado de uma chave (variável binária), foi necessário discretizar a posição de mínimo global encontrada pelo algoritmo, determinando o estado das chaves e finalmente a melhor configuração do alimentador. A Equação (18) é a formulação para conversão dos valores reais em variáveis binárias:

$$SW_i = \begin{cases} 0, & \text{se } X_i^j > 0 \\ 1, & \text{se } X_i^j \leq 0 \end{cases} \quad (18)$$

onde:

$X_i^j$ : valor contínuo da posição da libélula;

$SW_i$ : estado da chave  $i$ .

Atualização dos coeficientes separação (s), alinhamento (a), coesão (c), atração por comida (f), distração dos inimigos (e) e inércia (w): a atualização destes coeficientes determina o grau de importância sobre o cálculo dos parâmetros Separação, Alinhamento, Coesão, Atração por Comida, Distração dos Inimigos e Inércia, interferindo também no cálculo da velocidade das libélulas dentro de cada enxame que, por sua vez, implica na alteração das posições das libélulas no espaço de busca. A atualização dos coeficientes foi realizada com base no proposto em MAFARJA *et al.* (2017); (MIRJALILI, 2016).

Cálculo dos parâmetros Separação (S), Alinhamento (A), Coesão (C), Atração por Comida (F), Distração do Inimigo (E): para cada enxame  $X_i^j$ , com  $i = 0, 1, \dots, N_{libélulas}$  e  $j = 0, \dots, 15$ , aplica-se o método proposto em MAFARJA *et al.* (2017); (MIRJALILI, 2016) para computar a nova posição das libélulas e, conseqüentemente, executar a atualização da posição das libélulas no espaço de busca. Esta etapa é repetida para todas as libélulas do enxame e para todos os 16 enxames presentes no algoritmo.

## 3 RESULTADOS

### 3.1 Plano de Expansão de Capacidade para o Alimentador Teste Original

Para fins de comparação, foi determinado o plano de expansão de capacidade para o alimentador descrito na seção 2, sem qualquer tipo de reconfiguração. O plano de expansão de capacidade para o alimentador teste original é mostrado na Tabela 3 e os respectivos valores de perdas técnicas estão apresentadas na Tabela 4. Na Tabela 3,  $\ell$  é o comprimento da linha; R é o condutor utilizado para recondutoramento da linha; NL é o condutor utilizado para construção de uma nova linha;  $I_{max}$  é a capacidade máxima da linha após a execução do plano de expansão de capacidade; Custo representa o valor total gasto para repotencialização/construção do trecho. O horizonte de análise (coluna Ano) variou entre 0 (instante inicial) e 5 (após 5 anos do instante inicial). Vale ressaltar que as linhas que não possuem modificação ou que não excederam o limite de carregamento estabelecido no plano de expansão de capacidade (66% da capacidade do condutor) não foram modificadas.

De acordo com a Tabela 3, o plano de expansão de capacidade foi executado em 3 estágios. Para o 1º estágio (ano 0), as linhas I115, I3, I7 e I10 necessitaram de recondutoramento e construção de uma nova linha, aumentando capacidade do trecho de 500 A para 1.390 A. Já a linha I10 necessitou de construção de uma nova linha em paralelo à existente para suportar o carregamento de corrente, aumentando a capacidade do trecho de 500 A para 1.290 A. Por fim, a linha I116 necessitou de um recondutoramento, aumentando sua capacidade de 500 A para 790 A. As obras do 1º estágio (ano 0) totalizaram um custo de expansão de capacidade de R\$ 544,5 mil, com 12,1 km de linhas alteradas. No 2º estágio de planejamento (ano 1) apenas a linha I52 necessitou de ser recondutorada, totalizando um custo de expansão de capacidade de R\$ 38,9 mil, com 0,96 km de linha alterada. No 3º estágio de planejamento (ano 2), as linhas I53, I55 e I58 careceram de reforço, necessitando de recondutoramento, aumentando a capacidade dos trechos de 500 A para 790 A. O custo total das obras para o 3º estágio foi de R\$ 238,4 mil, com 5,91 km de linhas alteradas. Não houve necessidade de execução de obras de expansão de

capacidade nos anos 3, 4 e 5. Por fim, o custo total do plano de expansão de capacidade foi de R\$ 821,8 mil, com 18,91 km de linhas alteradas. Em todos os estágios, os níveis de tensão permaneceram na faixa estabelecida em regulamentação específica - entre 0,93 pu a 1,05 pu, conforme especificado na seção 2 (BRASIL, 2021b).

**Tabela 3** - Plano de Expansão de Capacidade para o Alimentador Teste Original

Ano	Linha	$l$ (km)	R	NL	$I_{max}(A)$	Custo (10 <sup>3</sup> R\$)
0	I115	0,6437	AA7	AA6	1390	161,7
	I3	0,4828	AA7	AA6	1390	121,2
	I7	0,3219	AA7	AA6	1390	80,8
	I10	0,4828	-	AA7	1290	103,0
	I116	0,6437	AA7	-	790	77,8
1	I52	0,3219	AA7	-	790	38,9
2	I53	0,2012	AA7	-	790	24,3
	I55	0,5633	AA7	-	790	68,1
	I58	1,2070	AA7	-	790	146,0
Quantidade de estágios (-)						3
Quantidade de linhas reforçadas (-)						9
Comprimento total de linhas reforçadas (km)						18,9
Quantidade de linhas reconduzidas (-)						8
Quantidade de linhas construídas (-)						4
Custo total (10 <sup>3</sup> R\$)						821,8

Fonte: autores.

**Tabela 4** - Perdas Técnicas para o Alimentador Teste Original

Ano	Perdas Técnicas (kW)
0	95,4
1	109,9
2	126,8
3	146,5
4	168,6
5	193,9

Fonte: autores.

### 3.2 Plano de Expansão de Capacidade para o Alimentador Teste com Reconfiguração

O plano de expansão de capacidade para o alimentador teste com reconfiguração da rede é mostrado na Tabela 5 e os respectivos valores de perdas técnicas estão apresentados na

Tabela 6. Diante dos dados expostos na Tabela 5, é possível destacar a redução no custo da expansão de capacidade e, conseqüentemente, no número de linhas reforçadas/construídas. No primeiro estágio (ano 0), o custo total da expansão de capacidade foi de R\$ 482,4 mil, perfazendo um total de 2,37 km de linhas alteradas. No estágio 2 (ano 2), apenas uma modificação foi necessária, no valor de R\$ 160,5 mil em uma linha de 1,33km. O custo total de expansão de capacidade foi de R\$ 643,0 mil, com alterações em 14,56 km de linhas. Não houve necessidade de execução de obras de expansão de capacidade nos anos 1, 3, 4 e 5. Vale destacar também as linhas I115, I3, I7 e I10 que, mesmo com a reconfiguração do alimentador, necessitaram de reforço para obedecer ao limite de carregamento. Adicionalmente, salienta-se que as linhas I52, I53, I55, I58 e I116 ultrapassaram o limite de carregamento para o plano de expansão de capacidade da rede de testes original; entretanto, para a rede reconfigurada, não atingiram o carregamento de 66% da capacidade do condutor, devido a reconfiguração do alimentador. Porém, com a reconfiguração do alimentador, as linhas I13 e I93 foram reforçadas para suportar a corrente máxima permitida pelo plano de expansão de capacidade. Vale destacar também a que linha I10 necessitou apenas da construção de uma nova linha em paralelo à existente, gerando apenas custo de construção de uma nova linha utilizando o condutor AA7. Em todos os estágios os níveis de tensão permaneceram na faixa estabelecida em regulamentação específica - entre 0,93 pu a 1,05 pu, conforme especificado na seção 2 (BRASIL, 2021b).

**Tabela 5** - Plano de Expansão de Capacidade para o Alimentador Teste com Reconfiguração

Ano	Linha	$l$ (km)	R (A)	NL (A)	$I_{max}$ (A)	Custo ( $10^3$ R\$)
0	I115	0,6437	AA7	AA6	1390	161,65
	I3	0,4828	AA7	AA6	1390	121,23
	I7	0,3219	AA7	AA6	1390	80,82
	I10	0,4828	-	AA7	1290	103,03
	I93	0,4426	AA5	-	500	15,71
2	I13	1,3277	AA7	-	790	160,52
Quantidade de estágios (-)						2
Quantidade de linhas reforçadas (-)						6
Comprimento total de linhas reforçadas (km)						14,56
Quantidade de linhas reconduzidas (-)						5
Quantidade de linhas construídas (-)						4
Custo total ( $10^3$ R\$)						642,95

Fonte: autores.



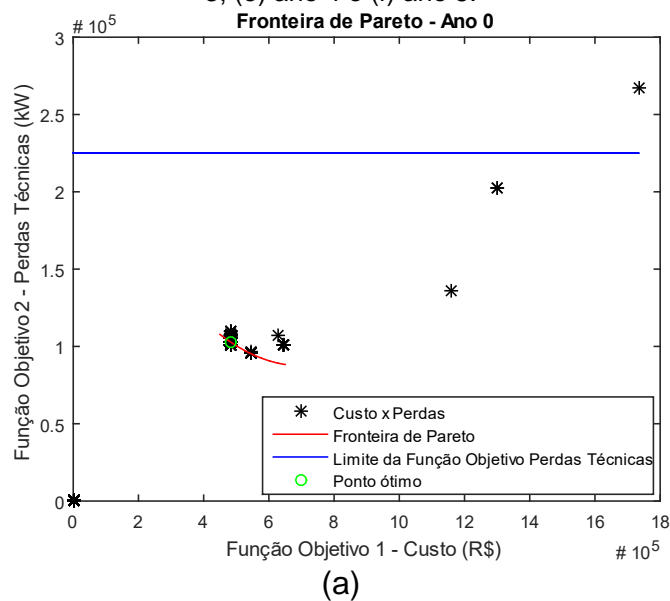
**Tabela 6** - Perdas Técnicas para o Alimentador Teste com Reconfiguração

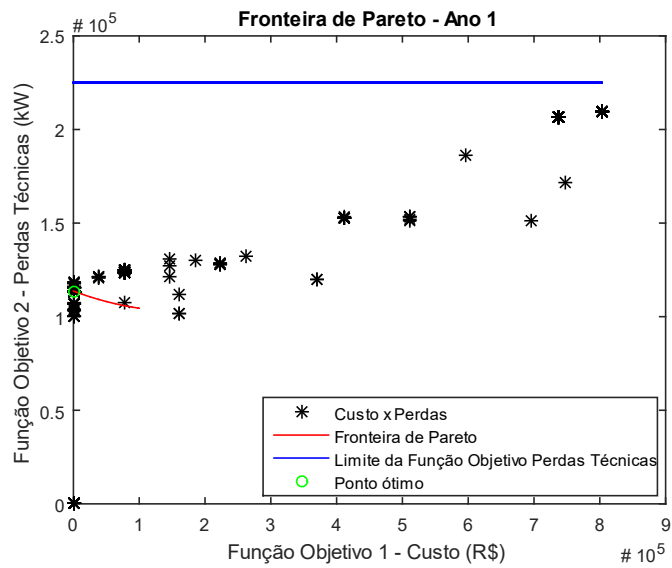
Ano	Perdas Técnicas (kW)
0	102,83
1	113,02
2	128,10
3	148,22
4	178,19
5	220,28

Fonte: autores.

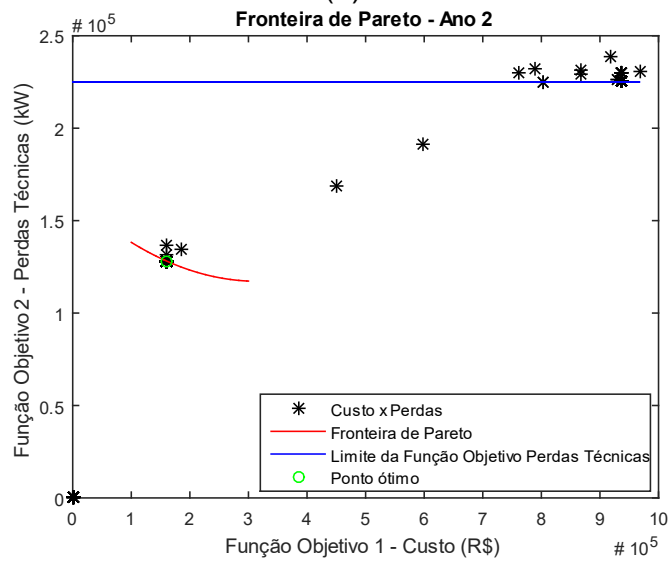
Buscando apresentar um maior detalhamento do funcionamento do algoritmo *Dragonfly*, a Figura 2 exprime os resultados de espaço de objetivos encontrados, bem como a restrição da função objetivo perdas técnicas e a fronteira de Pareto para todo o horizonte de planejamento proposto. Vale lembrar que a cada ano é proposto um modelo de reconfiguração, por conseguinte, um novo plano de expansão de capacidade e, por consequência, um novo custo de expansão de capacidade; logo, tem-se então 5 espaços de solução.

**Figura 2** - Espaço objetivo factível e fronteira de Pareto: (a) ano 0, (b) ano 1, (c) ano 2, (d) ano 3, (e) ano 4 e (f) ano 5.

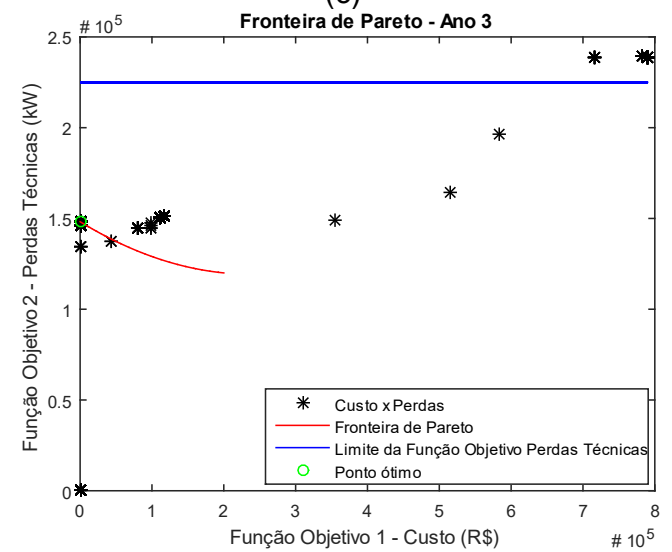




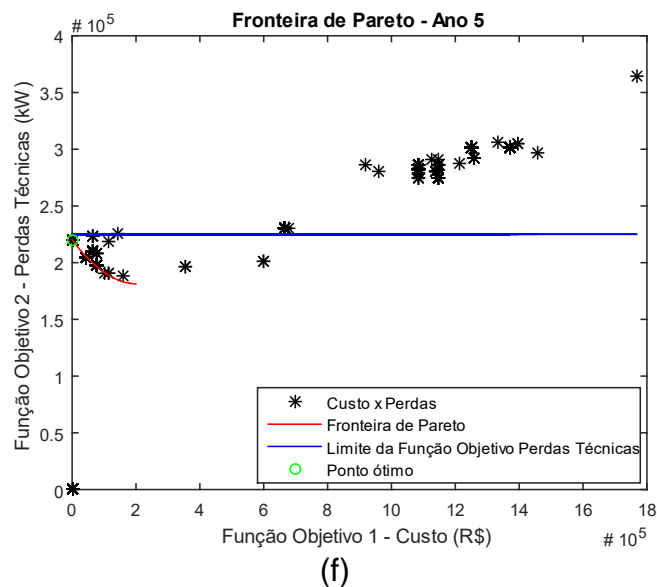
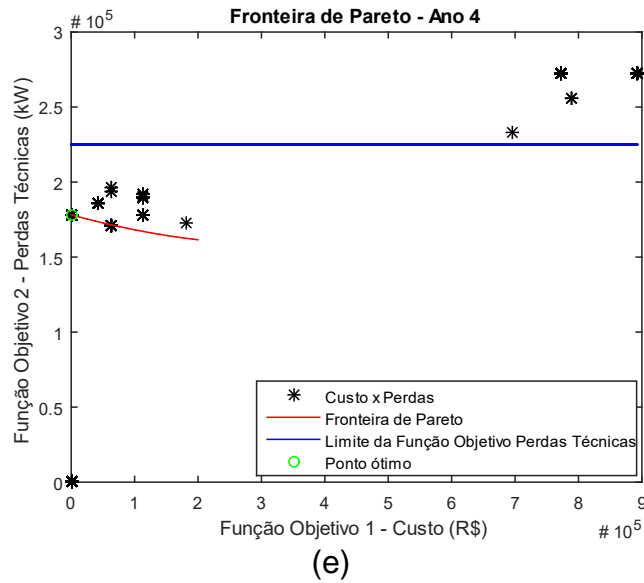
(b)



(c)



(d)



Fonte: Dos autores.

A partir da Figura 2 constata-se que qualquer solução apresentada dentro do espaço de objetivos limitado entre  $f_2(f_1) = 0 \text{ kW}$  e  $f_2(f_1) = 225 \text{ kW} \forall f_1 \in S^*$  (espaço limitado pelo eixo  $x$  e a reta de cor azul) pode ser escolhida como ponto ótimo, pois as soluções são não dominadas pelas demais. A solução destacada com círculo verde representa um ótimo de Pareto, sendo a melhor solução modelada pela função de avaliação de desempenho. Por fim, pode-se afirmar que não existe solução, dentro de  $S^*$ , que tenha custo anual e perdas técnicas menor do que àquelas apresentadas na Figura 2. De forma complementar, as

soluções fora da Fronteira de Pareto não satisfazem as restrições impostas na seção 2; por isso, não foram escolhidas como um ponto ótimo.

### 3.3 Comparativo entre o Plano de Expansão de Capacidade para o Alimentador Teste Original e o Plano de Expansão de Capacidade para o Alimentador Teste com Reconfiguração

A comparação entre os dois planos de expansão de capacidade permite identificar a efetividade da proposta. A Tabela 7 exprime os resultados obtidos.

**Tabela 7** - Comparação entre o Plano de Expansão de Capacidade para o Alimentador Teste Original e o Plano de Expansão de Capacidade para o Alimentador Teste com Reconfiguração

Parâmetro	Original	Com reconfiguração	Δ%
Quantidade de linhas reforçadas	9	6	-33%
Comprimento de linha instalado (km)	18,9	14,5	-23%
Custo total (mil R\$)	821,8	643,0	-22%
Quantidade de linhas reconduzidas	6	5	-17%
Quantidade de linhas construídas	4	4	0%
Perdas técnicas - Ano 0 (kW)	95,4	102,8	8%
Perdas técnicas - Ano 1 (kW)	109,9	113,0	3%
Perdas técnicas - Ano 2 (kW)	126,8	128,1	1%
Perdas técnicas - Ano 3 (kW)	146,5	148,2	1%
Perdas técnicas - Ano 4 (kW)	168,6	178,2	6%
Perdas técnicas - Ano 5 (kW)	193,9	220,3	14%

Fonte: autores.

Na Tabela 7 estão comparados os resultados das duas situações avaliadas. O plano de expansão de capacidade com reconfiguração proposto mostrou-se mais eficiente, com uma redução no custo da expansão de 22% em relação aos custos do sistema original, totalizando uma economia de R\$ 178,9 mil. Ainda no âmbito de redução de custos de reforços da rede, houve uma redução de 33% no quantitativo de linhas reforçadas. Ainda houve uma diminuição de 4,44 km em instalações de novas linhas. Por conseguinte, o número de linhas reconduzidas também reduziu em 17%; entretanto, o número de linhas construídas se manteve constante.

No que diz respeito as perdas técnicas, o plano de expansão de capacidade com reconfiguração se mostrou menos eficiente, com melhor desempenho nos anos 2 e 3 e pior desempenho no ano 5. Como especificado na seção 2, a função objetivo principal foi minimização de custos; logo, dentro

de um problema multiobjetivo, não há como minimizar uma função objetivo sem que haja punição dos demais objetivos. Este fato, em particular, ocorre pois o espaço de soluções limitado pelas  $\varepsilon$ -restrições pode conter soluções com piores valores de perdas (mas ainda dentro do limite estabelecido), porém, melhores valores de custo da expansão de capacidade; assim, a escolha de não reforçar um trecho, acarretou o aumento das perdas técnicas, quando houve alteração na configuração do alimentador.

## **4 CONCLUSÕES**

Este trabalho apresentou uma proposta de solução para o problema do planejamento da expansão de capacidade de sistemas de distribuição de energia elétrica, considerando a minimização de perdas técnicas e custos da expansão, através da reconfiguração do alimentador, por meio do algoritmo *Dragonfly*.

Nas simulações executadas, a heurística foi capaz de encontrar novas configurações das chaves presentes no alimentador, de modo que alcançou boas soluções que minimizaram os custos da expansão de capacidade em 22% em relação ao sistema sem reconfiguração; porém, houve aumento médio das perdas técnicas de 5% em relação ao sistema original.

Os resultados obtidos foram importantes para os métodos de planejamento de expansão da capacidade, trazendo a possibilidade de reconfigurar o alimentador para evitar o reforço das linhas para obedecer ao critério de carregamento estabelecido pelo plano de obras da distribuidora.

## **AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem ao apoio financeiro e institucional do Instituto Federal do Espírito Santo (IFES).

## REFERÊNCIAS

BACEN. Calculadora de Indicadores Econômicos. Brasília, 2021. Disponível em: <  
<https://www3.bcb.gov.br/CALCIDADAOPublico/exibirFormCorrecaoValores.do?method=exibirFormCorrecaoValores> >.

BENITEZ CATTANI, I. A. R1 Distribution System Operation and Expansion Planning using Network Reconfiguration. **IEEE Latin America Transactions**, v. 18, n. 5, p. 845-852, 04/24 2020. Disponível em: <  
<https://latamt.ieeeer9.org/index.php/transactions/article/view/1753> >. Acesso em: 2022/09/19.

BO, H.; NIU, X.; WANG, J. Wind Speed Forecasting System Based on the Variational Mode Decomposition Strategy and Immune Selection Multi-Objective Dragonfly Optimization Algorithm. **IEEE Access**, v. 7, p. 178063-178081, 2019. ISSN 2169-3536.

BRASIL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) - Módulo 2 - Planejamento da Expansão do Sistema de Distribuição de 07 de Dezembro de 2021**. Brasília 2021a.

\_\_\_\_\_. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) - Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica de 21 de Dezembro de 2021**. Brasília 2021b.

CHEN, G. et al. Hybridization of Chaotic Grey Wolf Optimizer and Dragonfly Algorithm for Short-Term Hydrothermal Scheduling. **IEEE Access**, v. 8, p. 142996-143020, 2020. ISSN 2169-3536.

COSSI, A. M. **Planejamento de redes de distribuição de energia elétrica de média e baixa tensão**. 2008. 233 (Doutorado em Engenharia Elétrica). Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira.

DAVOODI, A.; ABBASI, A. R.; NEJATIAN, S. Multi-objective techno-economic generation expansion planning to increase the penetration of distributed generation resources based on demand response algorithms. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 138, p. 107923, 2022/06/01/ 2022. ISSN 0142-0615. Disponível em: <  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061521011340> >.

GRISALES, L. F. et al. Optimal Planning and Operation of Distribution Systems Considering Distributed Energy Resources and Automatic Reclosers. **IEEE Latin America Transactions**, v. 16, n. 1, p. 126-134, 2018. ISSN 1548-0992.

KAGAN, N.; OLIVEIRA, C. C. B. D.; ROBBA, E. J. **Introdução aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica**. 1ª Edição. São Paulo: Blucher, 2005.

LI, L.-L. et al. Short-term wind power forecasting based on support vector machine with improved dragonfly algorithm. **Journal of Cleaner Production**, v. 242, p. 118447, 2020/01/01/ 2020. ISSN 0959-6526. Disponível em: < <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652619333177> >.

MAFARJA, M. M. et al. Binary Dragonfly Algorithm for Feature Selection. **International Conference on New Trends in Computing Sciences - ICTCS 2017**, 2017.

MAZHARI, S. M.; MONSEF, H.; ROMERO, R. A Hybrid Heuristic and Evolutionary Algorithm for Distribution Substation Planning. **IEEE Systems Journal**, v. 9, n. 4, p. 1396-1408, 2015. ISSN 1937-9234.

MIRJALILI, S. Dragonfly algorithm: a new meta-heuristic optimization technique for solving single-objective, discrete, and multi-objective problems. **Neural Computing and Applications**, v. 27, n. 4, p. 1053-1073, 2016/05/01 2016. ISSN 1433-3058. Disponível em: < <https://doi.org/10.1007/s00521-015-1920-1> >.

NASHAAT, H. et al. Dragonfly-Based Joint Delay/Energy LTE Downlink Scheduling Algorithm. **IEEE Access**, v. 8, p. 35392-35402, 2020. ISSN 2169-3536.

NASRI, A.; ABDOLLAHI, A.; RASHIDINEJAD, M. Multi-stage and resilience-based distribution network expansion planning against hurricanes based on vulnerability and resiliency metrics. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 136, p. 107640, 2022/03/01/ 2022. ISSN 0142-0615. Disponível em: < <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061521008723> >.

PÁDUA, S. G. B. D. **Planejamento de sistemas de distribuição de energia elétrica de média tensão através de um algoritmo de busca dispersa**. 2005. 192 (Doutorado em Engenharia Elétrica). Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira.

PINTO, R. S. **Planejamento multiestágio da expansão de sistemas de distribuição considerando confiabilidade e geração distribuída no contexto de smart grids**. 2018. 118 (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

PRASATH, R.; KUMANAN, T. Underwater Image Enhancement With Optimal Histogram Using Hybridized Particle Swarm and Dragonfly. **The Computer Journal**, v. 64, n. 10, p. 1494-1513, 2021. ISSN 1460-2067.

RODRIGUES, B. R. P. J.; COSSI, A.; MANTOVANI, J. R. S. Planejamento de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica através de um modelo de Programação Não Linear Inteiro Misto e Busca Tabu. **XXXLIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional**, 2011.

VAHIDINASAB, V. et al. Overview of Electric Energy Distribution Networks Expansion Planning. **IEEE Access**, v. 8, p. 34750-34769, 2020. ISSN 2169-3536.

ZHOU, L. et al. An optimal expansion planning of electric distribution network incorporating health index and non-network solutions. **CSEE Journal of Power and Energy Systems**, v. 6, n. 3, p. 681-692, 2020. ISSN 2096-0042.

ZHOU, Y. et al. Short-term wind power prediction optimized by multi-objective dragonfly algorithm based on variational mode decomposition. **Chaos, Solitons & Fractals**, v. 157, p. 111982, 2022/04/01/ 2022. ISSN 0960-0779. Disponível em: < <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960077922001928> >.