

Aplicação do Algoritmo Colônia de Formigas na Restauração de Redes Elétricas de Distribuição

Erick Baleeiro da Silva¹, Thiago Lopes Alencar de Carvalho¹, Niraldo Roberto Ferreira¹.

1. Departamento de Engenharia Elétrica
Universidade Federal da Bahia
Salvador, Brasil

erick_baleeiro@hotmail.com, thiagolacarvalho@gmail.com, niraldo@ufba.br

Resumo— Os sistemas de distribuição são muito susceptíveis à ocorrência de faltas que, por muitas vezes, provocam interrupções permanentes no fornecimento de energia elétrica em parte do sistema. A restauração do sistema ocorre por meio de operações de chaveamento que definem uma nova configuração durante o restabelecimento de energia. Essa configuração deve ser determinada de modo que se tenha o menor número de cargas não atendidas, a fim de respeitar as restrições operacionais e topologia radial da rede. Diversas técnicas foram desenvolvidas para sanar o problema como subsídio ao operador do sistema, visto que a restauração é um procedimento complexo de decisão e controle o qual deve ser solucionado o mais breve possível. Este artigo propõe um algoritmo baseado em otimização por colônia de formigas – *Ant Colony Optimization* (ACO), para restaurar redes elétricas de distribuição. O método implementado foi testado em sistemas elétricos de 16 e 33 barras encontrados na literatura. Os resultados obtidos são comparados aos de outros autores.

Palavras-chave— Otimização por colônia de formigas; restauração de redes de distribuição; computação bioinspirada; métodos heurísticos; método da soma de potência;

I. INTRODUÇÃO

O objetivo de um sistema elétrico de potência (SEP) é gerar, transmitir e distribuir energia elétrica, de forma a atender padrões que exigem confiabilidade, disponibilidade, qualidade, segurança e custos, com o mínimo impacto ambiental. Entretanto, diversos fatores dificultam alcançar tal objetivo, tais como: oscilações na demanda, falhas na geração, transmissão e distribuição, dentre outros fatores.

O problema de restauração possui natureza não linear, com variáveis contínuas e binárias. Portanto, originalmente é um problema de programação não linear inteira mista (PNLIM). A dimensão do problema tem relação direta com a quantidade de chaves manobráveis; desta forma, pode ser determinada pela relação 2^n , onde n é o número de chaves. Logo, quanto maior o número de chaves manobráveis, maior será a dimensão do problema [1], [2], [3].

Na resolução do problema de restauração de redes elétricas de distribuição, além de se encontrar uma configuração que restaure grande quantidade de cargas, é interessante que este processo seja realizado com o menor número de manobras. Cabe enaltecer que o período restaurativo tem relação direta

com a quantidade de chaveamentos, uma vez que as chaves operadas, manualmente, necessitam de um determinado tempo para comutação – deslocamento da equipe e tempo de manobra [4].

Algoritmos bioinspirados têm sido aplicados para resolver problemas de restauração, a fim de proporcionar esforços computacionais cada vez menores. Alguns métodos podem ser citados, como por exemplo: colônia de formigas [4], busca de tabu reativa [5], nuvem de partículas [6] e algoritmos genéticos [7].

Dentre os métodos já mencionados, o algoritmo colônia de formigas destaca-se devido à sua eficiência na resolução de problemas de otimização de natureza combinatoria [8]. Nas últimas décadas, modificações e novas versões têm sido propostas no intuito de melhorar o desempenho dos algoritmos de formigas; tendo como principal desafio a busca de uma melhor solução com o esforço computacional aceitável.

Neste trabalho, um algoritmo de otimização por colônia de formigas (ACO), para solucionar um problema de minimização da potência não suprida (PNS) e quantidade de chaveamentos (CH) durante o processo de restauração, é proposto. O problema de minimização, já mencionado, é formulado em um quadro de programação o qual utiliza uma variante do ACO, a *Ant Colony System* (ACS). Os algoritmos ACO, são técnicas baseadas no comportamento de formigas reais durante a busca por alimentos [4]. A versão ACS, devido às suas características de construção, promove uma maior exploração do espaço de busca, favorecendo a sua aplicação neste tipo de problema [9].

O artigo está organizado da seguinte forma: a seção II apresenta a formulação matemática para o problema de minimização da PNS e CH. Os detalhes deste algoritmo são descritos na terceira e quarta seção. Na seção V, as soluções numéricas são explanadas para demonstrar o desempenho do método proposto. Por fim, são realizados comentários válidos do estudo a partir das relações e problematizações verificadas.

II. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

A. Formulação matemática do problema de restauração de redes elétricas de distribuição

Em (1) é visto o problema de minimização, de forma a ponderar a quantidade de cargas não supridas e a relação da quantidade de chaveamentos.

$$\min f = \alpha PNS + \beta CH \quad (1)$$

tendo como restrições:

- i. configuração radial da rede;
- ii. capacidade das ligações $I_i \leq I_{max,i}$;
- iii. tensões nas barras $V_{min,i} \leq V_i \leq V_{max,i}$.

α é o fator de ponderação da *PNS*; já β é o fator de ponderação da *CH*; I_i e $I_{max,i}$, magnitude da corrente e limite máximo de corrente em cada ramo i , respectivamente; V_i é o módulo da tensão na barra i ; V_{min} e V_{max} , limites mínimo e máximo de tensão nas barras. A primeira restrição aborda a admissibilidade de uma solução candidata; já as duas últimas restrições explanam a qualidade da solução encontrada.

B. Fluxo de potência para redes radiais e cálculo da PNS

Dentre os métodos mais eficientes para cálculo do fluxo de potência, em redes de distribuição, o método da soma de potência (MSP) proposto em [10], basea-se na varredura direta e reversa (*Backward-Forward*).

Em uma rede com topologia radial, o MSP supõe que, inicialmente, as perdas em todos os trechos são nulas e a cada iteração, as estimativas dessas perdas melhoram. Quando a tensão da subestação é fornecida e as perdas são consideradas nulas, pode-se calcular as tensões das barras conectadas diretamente à subestação (SE). Esse processo permanece até que todas as tensões das barras sejam calculadas. Após concluir a primeira parte (*forward*), obtém-se valores aproximados de todas as tensões das barras. Estes valores são ditos aproximados devido às perdas iniciais serem consideradas nulas. Conhecidos os valores de tensão, é possível calcular as perdas em todos os trechos e, em seguida, corrigir os fluxos no processo (*backward*). O processo completo (*forward – backward*) permanece até que a variação seja, nas perdas totais, maior que uma tolerância pré-estabelecida ou quando o limite de iterações for excedido.

A partir de uma ligação m , desde um nó i até o nó j e ψ ; um conjunto de x ligações a iniciar do nó j . De acordo com a Fig. 1.

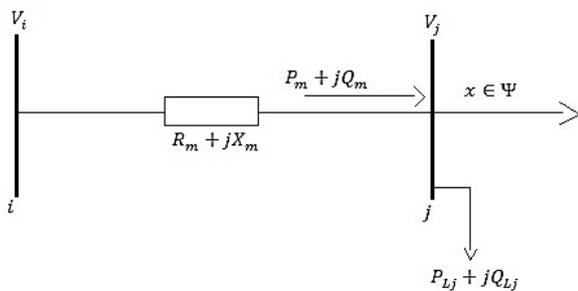


Figura 1: Ramo de um sistema de distribuição

Os fluxos, no final do trecho m , expressam-se do seguinte modo:

$$P_m = P_{L_j} + \sum_{x \in \psi} (P_x + \Delta P_x) \quad (2)$$

$$Q_m = Q_{L_j} + \sum_{x \in \psi} (Q_x + \Delta Q_x) \quad (3)$$

P_m e Q_m são fluxos de potência ativa e reativa, no fim da ligação m ; P_{L_j} e Q_{L_j} correspondem às potências ativa e reativa instaladas na barra j ; R_m e X_m a resistência e reatância da ligação m ; já V_i e V_j são tensões nas barras i e j , respectivamente.

Quando se tem um nó terminal, ψ é um conjunto vazio. Além disso, se a iteração for inicial, consideram-se nulas as perdas de potência ativa e reativa. Dessa forma, $P_m = P_{L_j}$ e $Q_m = Q_{L_j}$. A tensão no nó j depende da tensão no nó i , e expressa-se da seguinte forma:

$$V_{i+1} = \sqrt{A + \sqrt{A^2 + B}} \quad (4)$$

Onde,

$$A = \frac{V_i^2}{2} - (R_m P_m + X_m Q_m) \quad (5)$$

$$B = (R_m^2 + X_m^2)(P_m^2 + Q_m^2) \quad (6)$$

De modo que R_m e X_m são a resistência e reatância da ligação m , respectivamente. Depois que todas as tensões terem sido calculadas, os fluxos nos diversos trechos podem ser obtidos considerando as estimativas das perdas de potência ativa e reativa.

$$\Delta P_m = R(P_m^2 + Q_m^2)/V_j^2 \quad (7)$$

$$\Delta Q_m = X_m \Delta P_m / R_m \quad (8)$$

A perda de potência total do sistema é calculada efetuando a soma das perdas nos diversos trechos. Quando a diferença entre duas perdas consecutivas for menor que uma tolerância pré-estabelecida, o algoritmo chegará ao fim.

Após o MSP atingir a convergência, todas as tensões das barras são conhecidas, desta forma, é possível efetuar uma análise com o propósito de verificar se todas as barras do sistema atendem ao critério de tensão mínima, mencionada dentre as restrições. As barras que não respeitam os limites de tensão, serão consideradas como “barras desenergizadas”, descrita da seguinte maneira:

$$PNS = \sum_{k=0}^{k-1} h_k \quad (9)$$

h_k são as barras desenergizadas depois de k -th operações de chaveamento.

III. OTIMIZAÇÃO POR COLÔNIA DE FORMIGAS

A. O comportamento das formigas reais

Os comportamentos coletivos das formigas chamam a atenção dos observadores devido ao seu elevado padrão de organização. Em seu *habitat* natural, as formigas sempre conseguem encontrar o menor caminho entre o ninho e a fonte de alimento, isto só é possível graças à substância depositada ao longo da trilha, denominada feromônio. As demais formigas percebem a presença do feromônio e, atraídas, seguem a rota com maior concentração, conforme a Fig. 2 [11], [12].

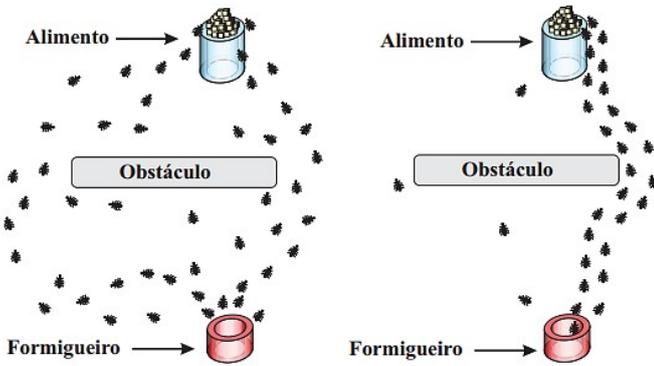


Figura 2: Deslocamento das formigas na busca de alimento [13]

ACO foi proposto em [13], para solucionar problemas de otimização de natureza combinatoriais difíceis de serem solucionados. Em algoritmos ACO, uma colônia de tamanho finito de formigas artificiais busca encontrar coletivamente soluções de boa qualidade para o problema em questão. Uma abordagem incremental é utilizada pelas formigas na construção da solução. De forma que, cada formiga estabelece uma solução e pode efetuar o depósito de feromônio durante a construção ou ao término da rota [14]. No geral, o depósito de feromônio é feito proporcionalmente a qualidade da solução. Dessa forma a menor rota vai ter uma concentração maior de feromônio, isto faz com que ela se torne mais atrativa para as demais formigas. Este mecanismo de *feedback* positivo direciona a pesquisa das formigas para a região mais promissora do espaço de busca.

B. Resolução do problema com o algoritmo colônia de formigas

Na construção de uma solução, cada chave é assumida para ser operada apenas uma vez [4]. A partir desse pressuposto, o

vetor de chaves a serem comutadas pode ser determinado, cujo estado modifica de aberto para fechado e vice-versa. O “vetor restauração” é o conjunto de chaves que altera o estado de aberto para fechado. Este vetor tem a finalidade de conectar os ramos isolados pela falta, o qual busca restaurar as cargas. Já o “vetor radialidade” é o conjunto de chaves que modifica o estado de fechado para aberto na busca de respeitar a restrição da configuração radial do sistema.

É *mister* salientar que, primeiramente, deve-se isolar o local da falta para evitar correntes de curto-circuito com magnitudes elevadas e, posteriormente, realizar a busca pelos vetores de radialidade e restauração.

Por exemplo, na Fig. 3, a falta é assumida na ligação S_4 . Na construção da solução, os vetores mencionados são dados por:

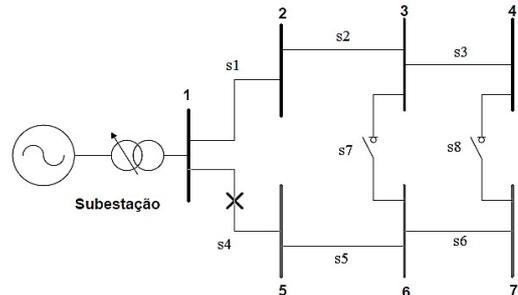


Figura 3: Sistema exemplo com defeito entre as barras 1 e 5

$$\begin{aligned} \text{vetor restauração} &= \{S_7, S_8\} \\ \text{vetor radialidade} &= \{S_1, S_2, S_3, S_5, S_6\} \end{aligned}$$

O processo de solução pode ser resumido nos seguintes passos:

- Passo 1: realizar o fechamento de uma chave do vetor radialidade;
- Passo 2: rodar o MSP e verificar as tensões nas barras e se atende ao critério de parada ($PNS = 0$), caso atenda, exibir a nova configuração do sistema e o PNS, caso contrário, seguir para o próximo passo;
- Passo 3: realizar os pares de, fechamento e abertura, do vetor restauração e radialidade, respectivamente e voltar ao passo 2.

A primeira operação de chaveamento do sistema pós-falta busca conectar o sistema, afetado pela falha, com uma barra desenergizada. Logo em seguida, é verificado o PNS da nova configuração

Posteriormente é realizado os pares de fechamento e abertura das chaves até encontrar um ponto de parada do algoritmo.

C. Ant Colony System (ACS)

O ACS foi proposto em [15], [16] para solucionar o problema do caixeiro viajante, *Traveling Salesman Problem* –

Posteriormente, é realizado o teste em um sistema de 33 barras do IEEE [21], composto por 33 barras de carga e 1 alimentador de 12.66 KV, carga total de 3.715 KW e 2300 KVAR e possui um total de 32 chaves normalmente fechadas e 5 chaves de interconexão.

Para ser possível efetuar a comparação dos resultados obtidos com os autores: [19] [20] e [22], adotou-se o sistema reconfigurado da Fig. 5. Existem falhas nos ramos S_5 e S_{35} , ao deixar as barras de número 5, 6, 9, 10, 11, 12, 13, 25, 26, 27, 28, 29, 30 e 31 desenergizadas.

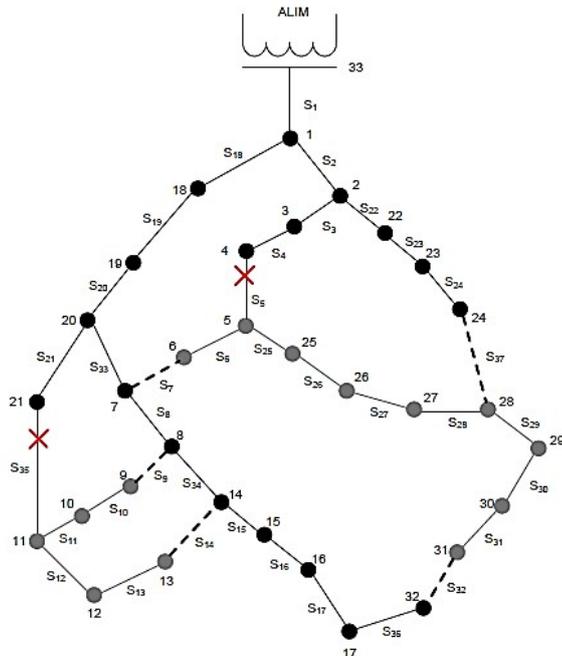


Figura 5: Sistema defeituoso de 33 barras - reconfigurado

Os parâmetros dos algoritmos de formigas foram estabelecidos para o melhor desempenho do programa e são apresentados na Tabela I.

TABELA I. VALORES DOS PARÂMETROS UTILIZADOS

Parâmetros	Símbolos	VALORES DOS PARÂMETROS UTILIZADOS	
		16 barras	33 barras
Quantidade de formigas	m	5	10
Peso do feromônio	α	1	1
Peso da inf. heurística	β	2	3
Taxa de evaporação	ρ	0,2	0,1
Taxa de decaimento	ϕ	0,1	0,1
Tolerância do MSP	ϵ	10^{-3}	10^{-3}
Feromônio inicial	τ_0	1	1
Nº de ciclos	<i>ciclos</i>	30	100

Na Tabela II, é possível verificar a solução encontrada pelo algoritmo para o sistema de 16 barras. Os resultados obtidos foram comparados a de outros autores.

TABELA II. COMPARAÇÃO DO RESULTADO FINAL DO RESTABELECIMENTO DO SISTEMA IEEE 16 BARRAS

Experimentos	Chaveamento	Tensão mínima	Carga final restabelecida
Busca Exaustiva [23]	Fechar S_8 Fechar S_7 Abrir S_6	0,954 p.u. (Barra 10)	100%
Lin e Chin [19]	Fechar S_7	0,950 p.u. (Barra 6)	67%
Borges [20]	Fechar S_8 Fechar S_7 Abrir S_6	0,954 p.u. (barra 10)	100%
Método Proposto	Fechar S_8 Fechar S_7 Abrir S_6	0,954 p.u.	100%

Para o sistema de 16 barras, a configuração final e o percentual de cargas restauradas estão de acordo com alguns valores encontrados na literatura. Os resultados foram comparados com três trabalhos [19], [20] e [23]. A metodologia proposta assim como o método encontrado em [20] e [23] restabelecem 100% das cargas do sistema chegando ao ótimo global para este problema. Já o método proposto por [19] restabelece apenas as cargas das barras 6 e 7 do sistema, após o fechamento da chave S_7 . Os limites de tensão, considerados, foram de 0,80 p.u. e 1,05 p.u.

A Tabela III mostra os resultados obtidos para o sistema de 33 barras com um limite de tensão de 0,85 p.u. Os resultados obtidos são comparados com o de outros autores.

TABELA III. COMPARAÇÃO DO RESULTADO FINAL DO RESTABELECIMENTO

Experimentos	Chaveamento	Tensão mínima	Carga final restabelecida
Busca Exaustiva [23]	Fechar S_{37} Fechar S_9	0,928 p.u. (Barra 6)	100%
Lin e Chin [19]	Fechar S_7 Fechar S_9	0,842 p.u. (Barra 31)	100%
Zidan e Elsaadany [22]	Fechar S_{37} Fechar S_{14}	0,928 p.u. (barra 6)	100%
Borges [20]	Fechar S_{37} Fechar S_9	0,928 p.u. (barra 6).	100%
Método Proposto	Fechar S_{37} Fechar S_9	0,928 p.u.	100%

A metodologia proposta, assim como os trabalhos [20] e [23], indica o restabelecimento ótimo para esse sistema nas condições consideradas. Embora as metodologias restaurem 100% da carga final, a metodologia proposta, assim como trabalhos mencionados, resolvem a problematização, com a ressalva de que o sistema resultante tem um quantitativo menor de perdas. A tabela IV realiza a comparação dos algoritmos propostos para o problema já mencionado; entretanto, dispõe de um limite de tensão mais rigoroso, no valor de 0,95 p.u.

TABELA IV. COMPARAÇÃO DO RESULTADO FINAL DO RESTABELECIMENTO DO SISTEMA IEEE 33 BARRAS –LÍMITE INFERIOR DE TENSÃO DE 0,95P.U.

Experimentos	Chaveamento	Tensão mínima	Carga final restabelecida
Lin e Chin [19]	Fechar S ₇ Fechar S ₉	0,951 p.u. (Barra 32)	8%
Zidan e Elsaadany [22]	Fechar S ₃₇ Fechar S ₁₄	0,950 p.u. (barra 6)	55%
Borges [20]	Fechar S ₃₇ Fechar S ₉ Fechar S ₃₂ Abrir S ₁₇ Fechar S ₇ Abrir S ₂₅	0,928 p.u. (barra 6).	64%
Método Proposto	Fechar S ₃₇ Fechar S ₉ Fechar S ₃₂ Abrir S ₁₇ Fechar S ₇ Abrir S ₂₅	0,928 p.u. (barra 6).	64%

A partir da Tabela IV, é possível verificar que o método proposto em [19] restabeleceu apenas 8% da carga do sistema; enquanto que a metodologia em [22] restaurou 55%. Continuando a análise, percebe-se que a metodologia proposta, assim como visto em [20], restabeleceu 64% com uma perda de 97 kW.

V. CONCLUSÃO

Neste artigo foi realizado um estudo do desempenho do algoritmo colônia de formigas aplicado à solução do problema de restauração de redes elétricas de distribuição. O algoritmo implementado foi a ACS, uma variante do ACO, devido às suas características serem mais apropriadas para este problema. A fim de verificar o desempenho do algoritmo proposto, o trabalho foi aplicado em dois sistemas (16 e 33 barras), e apresentou respostas coerentes com as expostas por outros trabalhos científicos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) pelo apoio financeiro prestado mediante concessão da bolsa de Mestrado.

REFERÊNCIAS

- [1] A. J. Monticelli, "Fluxo de carga em redes de energia elétrica". São Paulo: Edgard Blucher, 1983.
- [2] C.C Liu, S.J. Lee, S.S. Venkata, "An expert system operational aid for restoration and loss reduction of distribution systems." IEEE Transactions on Power Systems, v.3, n.2 (May), pp. 619 – 626, 1988.
- [3] R. Karn. Y. Kumar, G. Agnihotri, "Development of ACO Algorithm for Service Restoration in Distribution system." International Journal on Emerging Technologies, Bhopal, p. 71-77, 2011.
- [4] I. Watanabe, "An ACO Algorithm for Service Restoration in Power Distribution Systems". Evolutionary Computation, Congress IEEE, Japão, vol. 3, p. 2864-2871, 2005.
- [5] L. Silva, R. A. F. Pereira, J. Abbad, J.R.S, Mantovani. "Optimised Placement of Control And Protective Devices in Electric Distribution Systems Through Reactive Tabu Search Algorithm". Electric Power Systems Research, Elsevier, vol 78, p. 372-381, 2008.
- [6] L. Zhigang, D. Yuxiang. "Distribution System Restoration Based on Improved Binary Particle Swarm Optimization [J]." Automation of Electric Power Systems 24, 2006.
- [7] X. C. Xiaoping. "Determination of the Load Restoration Plans Based on Genetic Simulated Annealing Algorithms [J]." Transactions of China Electrotechnical Society 1, 2009.
- [8] M. Dorigo, Marco, M. Birattari, T. Stutzle. "Ant colony optimization." IEEE computational intelligence magazine 1.4, 2006.
- [9] M. Dorigo, T. Stutzle, "Ant colony optimization". MIT Press, 2004
- [10] R. G. Cespedes. "New method for the analysis of distribution networks." IEEE Transactions on Power Delivery 5.1, 1990.
- [11] B. A. Souza, J. P. S. Silva, N. R, Ferreira. "Configuração Ótima de Redes de Distribuição Aplicando um Algoritmo Colônia de Formigas". IEEE PES Transmission and Distribution Latin America Conference and Exposition, São Paulo, 2010.
- [12] B. A. Souza, J. P. S. Silva, N. R, Ferreira. "Aplicação de Algoritmo Colônia de Formigas na Reconfiguração de Redes Elétricas de Distribuição". Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente. São João Del Rei – MG, p. 1-6, 2011.
- [13] H. S. Sanca, R. F. Nivaldo. "Reconfiguração ótima de sistemas de distribuição de energia elétrica aplicando o algoritmo MAX-MIN Ant System". Dissertação de Mestrado, UFBA, 2013.
- [14] Dorigo, Marco, et al. "Positive feedback as a search strategy." 1991.
- [15] M. Dorigo, L. M. Gambardella. "Ant colonies for the traveling salesman problem". BioSystems, v.43, n.2, p.73–81, 1997a.
- [16] M. Dorigo, L. M. Gambardella. "Ant Colony System: A Cooperative Learning Approach to the Traveling Salesman Problem". IEEE Transactions on Evolutionary computation, v.1 n.1, p.53-66, 1997b.
- [17] F. S. Pereira, "Reconfiguração Ótima de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica Baseado no Comportamento de Colônia de Formigas". Tese de Doutorado. São Paulo, Brasil, Universidade de São Paulo, 2010.
- [18] Civanlar, Seyhan, et al. "Distribution feeder reconfiguration for loss reduction." IEEE Trans. Power Del.;(United States) 3.3, 1988.
- [19] Lin, Whei-Min, Hong-Chan Chin. "A new approach for distribution feeder reconfiguration for loss reduction and service restoration." IEEE Transactions on Power Delivery 13.3, 1998).
- [20] T. T. Borges, "Restabelecimento de Sistemas de Distribuição Utilizando Fluxo de Potência Ótimo". Rio de Janeiro: Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012.
- [21] Baran, E. Mesut., F.W. Felix. "Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing." IEEE Transactions on Power Delivery 4.2, 1989.
- [22] Zidan, Aboelsood, E. F. El-Saadany. "Service restoration in balanced and unbalanced distribution systems with high DG penetration." 2011 IEEE power and energy society general meeting. IEEE, 2011.
- [23] D.N. Arcanjo. "Metodologia multi-estágio para restabelecimento de sistemas elétricos de distribuição utilizando algoritmos bio-inspirados". Dissertação de mestrado, UFJV, 2014.