

Otimização por Colônia de Formigas para a análise de segurança de sistemas de energia elétrica

Juarez da Silva¹, Felipe Caon¹, Iverson Costa¹, José V. Canto dos Santos¹

¹Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS
Av. Unisinos, 950 Bairro Cristo Rei, São Leopoldo - RS

{juarezmachado, fvcaon}@edu.unisinos.br, iverson.c@gmail.com, jvcanto@unisinos.br

Abstract. *Security analysis in electrical systems is an arduous task with high importance degree for energy suppliers. In this task, contingency is the operational output of one or more equipment of a network, and contingency selection is the correct ascertainment of the most severe existent contingencies in a system. Indicate the contingencies is the first step to develop control action and maintain the system operation integrity. In this paper, the contingency selection problem is designed as a combinatorial optimization problem. This problem is solved using the Ant Colony Optimization (ACO) meta-heuristic. The ACO based method is presented and tested over IEEE30 bus test system with double contingencies. Results show that an accuracy close to 100% of severe contingencies were chosen by the algorithm, when compared to exhaustive method.*

Resumo. *A análise de segurança de redes elétricas é uma tarefa com elevado grau de importância para as concessionárias de energia elétrica. Nesta tarefa, uma contingência é a saída de operação de um ou mais equipamentos, enquanto que seleção de contingências é a determinação das contingências mais severas existentes no sistema. Indicar estas contingências é o primeiro passo para realizar ações de controle e manter a integridade da operação do sistema. Neste trabalho, a seleção de contingências é modelada como um problema de otimização combinatorial, e um algoritmo de Otimização por Colônia de Formigas, do inglês Ant Colony Optimization (ACO), é aplicado. O método é apresentado e testado em uma rede IEEE30, considerando contingências duplas de ramos no sistema. Os resultados demonstram, em comparação ao método exaustivo, uma exatidão próxima de 100% na seleção das contingências duplas de ramos mais severas, segundo o critério de violação de potência ativa nos ramos.*

1. Introdução

A energia elétrica é um recurso de grande importância para a sociedade, em que o desenvolvimento social e econômico são totalmente dependentes deste meio. Para chegar até o usuário final, a energia elétrica passa por diferentes processos e sistemas interconectados. Estes sistemas são chamados de Sistemas Elétricos de Potência (SEP). Os SEPs são então encarregados de conduzir a energia elétrica das fontes geradoras até os locais onde será consumida. Desse modo, a qualidade e a continuidade do fornecimento de energia têm um papel fundamental no modo de vida contemporâneo [Adibi 2000].

A constante expansão das redes elétricas, com a finalidade de proporcionar mais benefícios à população, traz consigo uma maior complexidade na operação e manutenção.

Esta complexidade demanda que a análise de segurança da rede elétrica seja verificada praticamente em tempo real, para evitar erros de decisão ao desconectar um equipamento da rede, ou ainda prever a possibilidade de saída de operação de um equipamento subdimensionado. A fim de atingir o objetivo de confiabilidade no fornecimento de energia elétrica para a população, os centros de controle devem investigar e identificar rapidamente distúrbios que podem ocorrer e, ao mesmo tempo, corrigi-los para que não haja surtos de tensão ou blecautes na rede. A análise de contingências é uma etapa relevante da análise de segurança, sendo esta responsável por determinar qual o nível de importância de cada equipamento de uma rede. Ela deve identificar entre todas as possibilidades de contingências, quais delas poderiam levar o sistema a um estado de instabilidade ou de insegurança [Srivani and Swarup 2008]. Uma análise extensiva sobre todas as contingências em uma rede elétrica torna-se inviável, devido às restrições de tempo impostas a essa operação. Neste sentido, as contingências mais graves devem ser identificadas de forma segura e ágil [Elgerd 1982]. Para auxiliar na análise de contingências de sistemas elétricos, é cada vez mais comum a utilização de métodos computacionais com o intuito de selecionar as contingências mais graves do sistema.

Para realizar a análise de contingências em um SEP, este trabalho trata a seleção de contingências como um problema de otimização combinatória análogo ao problema da mochila, do inglês *Knapsack Problem* (KP). O KP clássico consiste em maximizar o valor dos itens contidos em uma mochila, levando em consideração que a mochila tem uma capacidade finita e que, cada item, tem um valor. O objetivo, portanto, é encontrar a mochila mais valiosa, ou seja, encontrar uma lista de contingências contendo as contingências mais severas possíveis do sistema.

Como proposta de solução ao problema de otimização combinatória na seleção das contingências em um SEP, utiliza-se um algoritmo meta-heurístico de Otimização por Colônia de Formigas, do inglês *Ant Colony Optimization* (ACO) [Dorigo et al. 2006]. A modelagem do problema por KP e a utilização da meta-heurística ACO, levou a implementação para uma proposta onde cada formiga recebe uma mochila, e cada espaço desta mochila recebe uma contingência possível do sistema.

Para testar a abordagem proposta, levou-se em consideração a resolução de contingências duplas na rede de testes IEEE30, onde as contingências mais severas foram selecionadas sob aspecto de violação de fluxo de potência ativa nas linhas de transmissão.

2. Conceitos Básicos

2.1. Sistemas elétricos de potência

Um SEP consiste em um conjunto de instalações e equipamentos que são destinados a geração, transmissão, medição e distribuição de energia elétrica [Zanetta Jr 2006]. É necessário que os SEPs estejam sempre em pleno funcionamento enviando energia de forma segura a seus consumidores, ou seja, com uma taxa de falhas baixíssima. Em caso de falha, em qualquer parte de seu processo, o SEP deverá identificar onde a falha ocorreu e consertá-la de forma rápida e segura.

Falhas em SEPs podem ocorrer por motivos diversos, tais como sobrecargas na rede, fatores climáticos e envelhecimento de componentes eletrônicos. Quando estas falhas acontecem, a alimentação de outros componentes dependentes é interrompida. Logo, é necessária a substituição de componentes a fim de que a alimentação seja reestabelecida.

Em muitos SEPs, existem meios alternativos nas linhas de transmissões para a passagem de energia elétrica de um ponto a outro. Deste modo, se houver alguma falha na rede, a alimentação será interrompida para apenas uma parcela dos consumidores, aumentando assim a confiabilidade da rede elétrica. O grande problema de expandir a rede elétrica desta forma, é a complexidade na análise das linhas de transmissão em tempo real. Assim, é desejável o uso de algum algoritmo que possa realizar esta análise de forma rápida.

2.2. Análise de segurança

A Análise de Segurança em Redes Elétricas (AS) envolve a avaliação de dados da rede através de simulações para estimar seu estado de operação atual, como também para estimar a evolução desse estado de operação em um determinado (e geralmente curto) espaço de tempo [Balu 1992].

O crescimento constante da demanda energética, aliado aos insuficientes investimentos no sistema e à reestruturação do setor elétrico, têm contribuído para a operação dos sistemas de energia elétrica nas proximidades de seus limites de transmissão, o que torna a AS muito importante [Kabouris 2000]. Inserida neste contexto, a análise de contingências é uma das tarefas mais importantes para a operação de redes elétricas.

2.3. Análise de contingências

Contingência é a saída de operação de algum equipamento da rede, como um gerador, um transformador ou uma linha de transmissão [Sudersan A. 2004]. Contingências podem ocorrer por problemas atmosféricos, incêndios, erros humanos, falhas em equipamentos, entre outros [Almeida 2005]. Quanto a sua ordem, contingências podem ser simples ou múltiplas. Contingências simples envolvem a saída de operação de um equipamento da rede, enquanto que contingências múltiplas envolvem a saída de operação de dois ou mais equipamentos da rede [Balu 1992].

A saída de múltiplos equipamentos de operação ao mesmo tempo gera uma explosão combinatória. Podemos expressar a quantidade possível de contingências segundo a Equação 1.

$$C_{lk} = \frac{l!}{(l-k)! * k!} \quad (1)$$

onde:

C_{lk} : combinações possíveis de contingências no sistema;

l : quantidade de equipamentos do sistema;

k : quantidade de equipamentos na contingência.

O objetivo da análise de contingências é saber quais contingências, de todas possíveis, são mais graves em uma rede elétrica. Devido ao fato de flutuação de energia nas redes, a análise deve acontecer de forma contínua e rápida. Mesmo com todo avanço computacional atual, juntamente com as restrições impostas pelos SEPs, é impraticável uma análise de todas contingências em tempo real [Canto dos Santos et al. 2015]. Existindo assim a necessidade de algum algoritmo capaz de realizar esta análise de forma mais eficiente.

2.4. Otimização por Colônia de Formigas

A ACO é uma meta-heurística baseada no comportamento de formigas quando estas estão em busca de alimento. Proposto por [Dorigo 1992], o algoritmo consiste na busca do melhor caminho possível para determinadas situações através do uso de feromônio como agente de aprendizado.

Na natureza, as formigas saem aleatoriamente, à procura de alimento e, quando o encontram, deixam uma trilha de feromônio para que outras formigas possam chegar ao alimento. De forma análoga, a ACO implementa um algoritmo onde as formigas se adaptam de acordo com os resultados obtidos por outros agentes [Dorigo et al. 2006]. A meta-heurística pode ser implementada como mostra o pseudocódigo na Figura 1.

```
Sequência básica para implementação do ACO
Início do loop
  Solução
  Ações Daemon {opcional}
  Atualização de feromônios
Fim do loop
```

Figura 1. Pseudocódigo do algoritmo ACO.

O pseudocódigo da Figura 1 mostra procedimentos básicos de um algoritmo ACO, conforme sugerido pelos autores [Dorigo et al. 2006]:

- a) solução;
- b) ações *Daemon*;
- c) atualização de feromônios.

O primeiro procedimento consiste em representar a solução de acordo com a modelagem do problema, onde este deve ser visto em forma de grafo. As formigas irão se mover entre os nodos do grafo se houver algum tipo de conexão entre eles. O movimento entre os nodos do grafo de vizinhança também leva em consideração o feromônio depositado na região.

Ações *Daemon*, o segundo procedimento, diz respeito à implementações que tenham como objetivo refinar a busca no algoritmo, de forma a tomar melhores decisões e convergir a bons resultados mais rapidamente.

O procedimento de atualização de feromônios tem por objetivo guiar a busca através das taxas de deposição e evaporação. Um aumento excessivo na deposição do feromônio faz com que todas as formigas convirjam para a mesma solução. Em contrapartida, um aumento bem dimensionado na taxa de evaporação de feromônio pode fazer com que as formigas procurem soluções ainda não consideradas, pesquisando em novos espaços de busca, sendo estes espaços promissores ou não.

Considerando os procedimentos necessários à implementação do algoritmo ACO, é possível visualizar as principais variáveis que são necessárias para encontrar a melhor solução:

- número de formigas na busca;
- quantidade de feromônio depositada nas soluções encontradas;
- taxa de evaporação do feromônio.

2.5. Problema da mochila

O KP, é um problema de otimização combinatória. O problema proposto por [Dantzig 1957] levanta a questão de armazenar em uma mochila os objetos mais valiosos sem sobrecarregar sua capacidade, maximizando o valor dos itens colocados na mochila. Neste trabalho, a similaridade entre o KP e o problema da seleção de contingências é abordado da seguinte maneira:

- a) lista de contingências mais graves foi considerada como a mochila;
- b) foi considerada a quantidade desejada de contingências mais graves como a capacidade da mochila;
- c) considerou-se cada contingência possível como um item a ser incluído ou não na mochila;
- d) a severidade de cada contingência é tratada como o valor de cada item.

3. Metodologia e condução dos experimentos

Este trabalho apresenta o algoritmo ACO modelado com KP para a seleção das contingências mais severas de uma rede elétrica. Utilizou-se como critério de seleção das contingências a violação de fluxo de potência ativa nas linhas de transmissão e transformadores do sistema. Para otimizar a busca da solução da ACO, uma vez que o modelo considerado no trabalho é o de KP, foi codificada uma mochila para cada formiga da colônia. Esta mochila permite que cada formiga possa armazenar uma quantidade de contingências previamente parametrizada no algoritmo.

Foi definida como contingência a saída de operação de duas linhas de transmissão, ou seja, contingências duplas de ramo. Na rede IEEE30, o total de contingências duplas de ramo possíveis é 820, ou seja, a combinação binária de todos os 41 ramos existentes na rede tomados de dois a dois.

A severidade de cada contingência é determinada pelo cálculo de violações de fluxo de potência ativa. Inicialmente, um Fluxo de Carga Desacoplado Rápido (FCDR) [Stott and Alsac 1974] é executado para obter o estado de cargas e demandas atendidas para a rede. Após a simulação desse estado, é computado o Índice de Severidade de Fluxo (ISFI). O ISFI é calculado considerando o valor do fluxo de potência ativa, conforme a Equação 2:

$$ISFI = \sum_{l=1}^v \frac{pmw_l^2}{cmw_l^2} \quad (2)$$

onde:

- pmw_l*: fluxo de potência ativa do ramo *l*;
- cmw_l*: capacidade do ramo *l*, em MW;
- v*: número de ramos com sobrecarga;
- l*: índice do ramo sobrecarregado.

Após a execução do FCDR, as violações de fluxo de potência ativa em cada uma das linhas de transmissão são contabilizadas em ISFI. Essas violações ocorrem quando o fluxo de potência ativa em uma linha de transmissão é superior ao seu limite.

3.1. Fluxo de funcionamento do algoritmo

O algoritmo desenvolvido neste trabalho funciona conforme o fluxograma apresentado na figura 2. Inicialmente, cada formiga separa um subconjunto de barras. As barras que formam esse subconjunto são escolhidas de forma aleatória, sem levar em consideração qualquer critério de vizinhança. Dentre as barras do subconjunto, a formiga seleciona uma barra e, posteriormente, um ramo qualquer ligado a esta barra. A probabilidade de seleção da barra é afetada pela quantidade de feromônio depositada nela e a probabilidade de seleção de cada ramo é uniforme. A cada dois ramos selecionados, uma contingência é formada, e o FCDR é executado para estimar a geração e as cargas nesse cenário pós-contingência. Após a estimativa gerada pelo FCDR, a severidade da contingência é computada, utilizando-se ISFI. O processo de formação e cálculo de severidade de contingências é repetido até que a mochila esteja cheia. Durante o processo de preenchimento da mochila, podem ocorrer casos em que as contingências inviabilizem o cálculo do FCDR, seja por não convergência ou por desconexões. Esses casos são graves e, por isso, são separados pelo algoritmo para avaliação posterior.

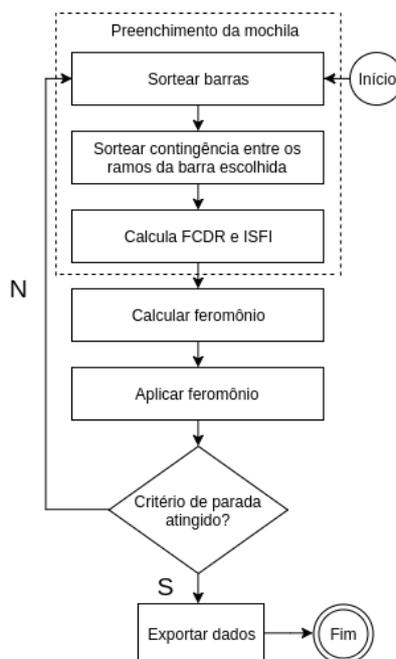


Figura 2. Diagrama de blocos para o programa proposto.

Assim que as formigas estejam com suas mochilas completas, inicia-se a etapa de distribuição de feromônio. O feromônio é aplicado a cada iteração em todas as barras ligadas às contingências da mochila, sendo este distribuído de forma inversamente proporcional ao maior ISFI encontrado até o momento ($ISFI_{max}$). O parâmetro denominado como Multiplicador de feromônio (M_{fr}), é definido no início do programa e tem como objetivo aumentar ou reduzir a velocidade de convergência por uma solução. É importante ressaltar que um M_{fr} muito alto pode levar a solução para ótimos locais. A Equação 3 apresenta a maneira como o Feromônio aplicado à Barra (FB_i) é realizada para cada mochila.

$$FB_i = \left(\frac{ISFl_i * M_{fr}}{ISFl_{max}} \right) + FB_i \quad (3)$$

onde:

FB_i : quantidade de feromônio que será depositada na barra sob análise;

$ISFl_i$: ISFl da contingência sob análise;

M_{fr} : multiplicador de feromônio;

$ISFl_{max}$: indica o maior ISFl encontrado até a iteração vigente.

O feromônio calculado é aplicado como um aditivo na probabilidade do sorteio das barras para as próximas iterações do algoritmo. Como a contingência é tratada observando os ramos, são elevadas as probabilidades das barras conectadas ao ramo da contingência sob análise.

Ao final da iteração, após todas as formigas terem atualizado o feromônio de todas as contingências em suas mochilas, o algoritmo realiza o cálculo de evaporação do feromônio, para evitar que o algoritmo fique preso em uma solução ótima local. A Equação 4, é executada em todas as barras do sistema com a finalidade de evaporar o feromônio aplicado nas iterações anteriores.

$$FB_i = (1 - \rho)FB_i \quad (4)$$

onde:

FB_i : quantidade de feromônio que será depositada na barra sob análise;

ρ : coeficiente de evaporação do feromônio.

A principal característica desejável para o algoritmo proposto é a capacidade de convergir a bons resultados utilizando poucos recursos computacionais, ou seja, fazendo varreduras de pequenas porções do espaço de busca.

3.2. Taxa de captura

A Taxa de captura (T_{cr}) é um escalar que mede o quanto um método de seleção é efetivo em retornar as contingências mais graves. Ele compara a lista de contingências mais graves retornada pelo método avaliado com a lista de contingências mais graves retornada pelo método exaustivo, que testa todas as contingências possíveis [Albuquerque 2005], [Quintela 2002]. A Equação 5 mostra como a T_{cr} é obtida:

$$T_{cr} = \frac{k_p}{N} * 100 \quad (5)$$

onde:

T_{cr} : taxa de captura;

N : quantidade de contingências graves que deseja-se capturar;

K_p : contingências sabidamente graves que estão nas posições p iniciais da lista;

p : posições tomadas da lista de contingências graves segundo o método avaliado.

Os valores N e p foram considerados como 20 para a rede IEEE30. Ou seja, ao final do programa, o algoritmo irá checar se os 20 primeiros valores encontrados pelo algoritmo ACO condizem com os 20 primeiros valores encontrados pelo ANAREDE®.

3.3. Percentual de varredura do espaço de busca

O espaço de busca pode ser entendido como o conjunto de todos os valores possíveis para as variáveis de decisão de um problema [Papadimitriou and Steiglitz 1998]. Neste trabalho, o espaço de busca considerado é o conjunto de todas as contingências duplas de ramo possíveis. O percentual de varredura do espaço de busca identifica quantas soluções, dentre as possíveis, foram testadas. Quanto menor o percentual, maior a eficiência. O percentual de varredura do espaço de busca é obtido através da Equação 6:

$$peb_i = \frac{qia_i}{C_k^r} \quad (6)$$

onde:

peb_i : percentual do espaço de busca atingido na iteração i ;
 qia_i : quantidade de contingências avaliadas até a iteração i ;
 C_k^r : combinações de r ramos tomados de k em k ;
 k : ordem das contingências.

4. Testes e resultados

O algoritmo ACO modelado com KP foi utilizado para encontrar as contingências duplas de ramo mais severas sob o ponto de vista de ISFI na rede IEEE30, que possui 820 contingências duplas de ramos possíveis.

Antes de iniciar os testes foram feitas as escolhas dos parâmetros a serem usados para obter o melhor resultado no algoritmo. Para apresentação de resultados duas parametrizações, listadas na Tabela 1, foram escolhidas:

Parâmetros	Parametrização 1	Parametrização 2
Tamanho da mochila	6	3
Quantidade de formigas	1	8
Favor de evaporação	10%	10%
Multiplicador de feromônio	800	1000
Número de iterações	350	500
Quantidade de barras para subconjunto de filtro	12	12

Tabela 1. Melhores parametrizações encontradas para a rede IEEE30.

Os resultados obtidos para ambas as parametrizações, média de 30 execuções, podem ser visualizados na Tabela 2:

Resultado	Parametrização 1	Parametrização 2
Espaço de busca varrido	68,0%	74,7%
Taxa média de captura	93,0%	95,5%

Tabela 2. Resultados dos testes na rede IEEE30, média de 30 execuções.

É possível visualizar, através das Figuras 3 e 4, que em ambos os casos, a taxa média de captura atinge valores acima de 90%. O que também deve ser levado em conta

é o percentual do espaço de busca varrido, que na parametrização 2 é 6,7% menor. Para aplicações em sistemas maiores, conforme o espaço de busca for maior, mais recursos computacionais serão necessários para a execução do algoritmo. Entretanto objetiva-se que um espaço de busca percentualmente menor seja necessário para obter taxas de captura similares.

Nos gráficos apresentados nas Figuras 3 e 4, o eixo das abcissas corresponde ao total de iterações, enquanto o eixo das ordenadas mostra o percentual atingido até a iteração. A Figura 3 mostra a parametrização 1, que utiliza apenas 1 formiga com 6 espaços na mochila. Nesta parametrização o algoritmo precisou de mais iterações para encontrar as contingências mais graves, porém os recursos computacionais utilizados foram menores, dado que um percentual menor do espaço de busca foi varrido. Na parametrização 2, apresentada na Figura 4, havia mais formigas, o que fez a taxa média de captura convergir de forma mais rápida.

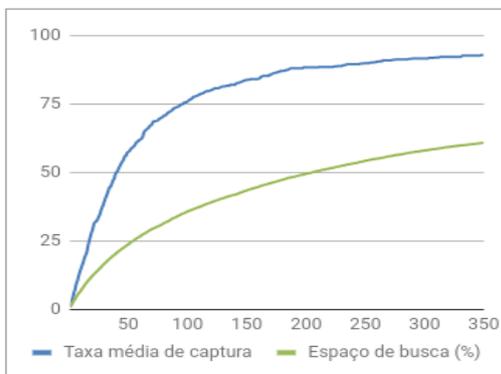


Figura 3. Parametrização 1

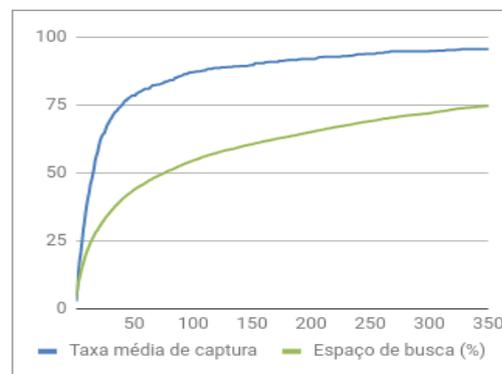


Figura 4. Parametrização 2

5. Conclusão e trabalhos futuros

Este trabalho, apresenta uma alternativa à etapa de seleção de contingências do problema de análise de segurança de sistemas de energia elétrica, utilizando um algoritmo baseado na meta-heurística ACO. Para que o algoritmo ACO fosse efetivo em encontrar as contingências mais graves, explorou-se a similaridade com o problema da mochila, resolvendo-se o mesmo como um problema combinatório. Com o objetivo de manter a seleção de contingências eficiente, foi utilizado para cálculo de fluxo de potência o método FCDR para obtenção de um caso base para o cômputo do ISFI. Embora eficaz, esse método, ainda demanda um certo esforço computacional.

Os resultados obtidos mostraram-se promissores pois, utilizando as parametrizações propostas, o algoritmo obteve resultados acima de 90% na taxa média de captura. Para a rede IEEE30, a parametrização 1 mostrou-se satisfatória, pois enquanto a taxa média de captura diferiu pouco em relação à parametrização 2, o espaço médio de busca se mostrou 6,7% menor, fazendo com que menos ciclos de *clock* sejam usados durante a execução do programa. Ao passo que o algoritmo se mostra eficaz, este poderá ser eficiente, pois a varredura média do espaço de busca se mostra baixa. Deste modo, se torna evidente que o algoritmo ACO pode ser considerado uma ferramenta promissora para a execução da seleção de contingências em redes maiores, o que justifica aprofundar os estudos na área.

Como trabalhos futuros, a meta será testar o algoritmo implementado em redes elétricas reais, de maior porte. Além disso, planeja-se fazer uma comparação do ACO com outras meta-heurísticas já estudadas para o problema de seleção de contingências.

Referências

- Adibi, M. (2000). Power system restoration. *Methodologies and Implementation Strategies. IEEE series on Power Engineering. PM Anderson. Series Editor.*
- Albuquerque, M. (2005). Seleção de contingências com relação a estabilidade de tensão para análise de segurança em tempo real. *Dissertação de mestrado.*
- Almeida, S. e Pestana, R. (2005). Definição e análise de contingências severas na rede eléctrica portuguesa. *9º Congresso Hispano-Luso de Engenharia Electrotécnica*, pages 1–9.
- Balu, N. (1992). On-line power system security analysis. *IEEE*, 80:262–280.
- Canto dos Santos, J. V. C., Costa, I. F., and Nogueira, T. (2015). New genetic algorithms for contingencies selection in the static security analysis of electric power systems. *Expert Systems with Applications*, 42(6).
- Dantzig, G. B. (1957). Discrete-variable extremum problems. *Operations research*, 5(2):266–288.
- Dorigo, M. (1992). Ottimizzazione, apprendimento automatico, ed algoritmi basati su metafora naturale. *Unpublished doctoral dissertation, Politecnico di Milano, Italy.*
- Dorigo, M., Birattari, M., and Stutzle, T. (2006). Ant colony optimization. *IEEE computational intelligence magazine*, 1(4).
- Elgerd, O. I. (1982). Electric energy systems theory: an introduction.
- Kabouris, J. (2000). Voltage security considerations in an open power market. *IEEE*, pages 278–283.
- Papadimitriou, C. and Steiglitz, K. (1998). *Combinatorial Optimization: Algorithms and Complexity*. Dover Books on Computer Science Series. Dover Publications.
- Quintela, A. (2002). Estudo de índices de proximidade ao limite de estabilidade de tensão e aplicação na seleção de contingências. *Dissertação de mestrado.*
- Srivani, J. and Swarup, K. (2008). Power system static security assessment and evaluation using external system equivalents. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 30(2):83–92.
- Stott, B. and Alsac, O. (1974). Fast decoupled load flow. *IEEE transactions on power apparatus and systems*, (3):859–869.
- Sudersan A., A. M. e. R. G. (2004). Contingency selection and static security enhancement in power systems using heuristics-based genetic algorithms. pages 556–560.
- Zanetta Jr, L. C. (2006). *Fundamentos de sistemas elétricos de potência*. Editora Livraria da Física.