

## UMA APLICAÇÃO DO ALGORITMO METAHEURÍSTICO SIMULATED ANNEALING PARA O PROBLEMA DE SELEÇÃO DE CONTINGÊNCIAS EM ANÁLISE DE SEGURANÇA DE REDES ELÉTRICAS

**Fausto Tomazi**

PIPCA - UNISINOS

Av. UNISINOS, 950 São Leopoldo RS

zecaft@gmail.com

**Cristina Bobsin**

PIPCA - UNISINOS

Av. UNISINOS, 950 São Leopoldo RS

crisbobsin@gmail.com

**José Vicente Canto dos Santos**

PIPCA - UNISINOS

Av. UNISINOS, 950 São Leopoldo RS

jvcanto@unisinis.br

### RESUMO

Este trabalho tem por fim a comprovação de que o algoritmo *Simulated Annealing* pode ser utilizado para o auxílio na resolução do problema de análise de segurança em sistemas de potência. A motivação desta aplicação é que um sistema de potência sofre constantes alterações em sua topologia, dificultando estudos estáticos para a solução do problema. A escolha do algoritmo de *Simulated Annealing* foi baseada em pesquisas bibliográficas e também por este algoritmo ser um dos mais simples na sua implementação, podendo muito facilmente ser combinado com outros algoritmos para ter uma melhoria de desempenho em uma busca por um ótimo global do problema. Como resultados são apresentados, para diversos sistemas elétricos, uma comparação entre os resultados encontrados pelo algoritmo de *Simulated Annealing* e pelo método clássico, utilizando a técnica de Taxa de Captura.

**PALAVRAS CHAVE.** *Simulated annealing*, Análise de Segurança, Sistemas de potência.

**Tópicos:** EN – PO na Área de energia

### ABSTRACT

This work is aimed to prove that the Simulated Annealing algorithm can be used for assistance in solving the power system security analysis problem. The motivation of this application is that a power system undergoes constant changes in the topology, making it difficult static studies to solve the problem. The choice of Simulated Annealing algorithm was based on bibliographic research and also for this algorithm is one of the simplest in its implementation, and can very easily be combined with other algorithms to have a performance improvement in a search for a global optimal solution. The results are presented for various electrical systems with a comparison between the results obtained by Simulated Annealing algorithm and the classical method using the capture ratio technique.

**KEYWORDS.** *Simulated Annealing*. Security Analysis. Power Systems.

**Paper topics:** EN - OR in Energy

## 1. Introdução

Nos dias atuais a energia elétrica é um recurso indispensável para o desenvolvimento da humanidade, sendo um dos principais itens que compõe os indicadores de desenvolvimento econômico. A energia elétrica para chegar até seu usuário final passa por diferentes processos e sistemas interconectados, estes sistemas são chamados de sistemas elétricos de potência (SEP), basicamente encarregados de levar a energia elétrica das fontes geradoras até os locais onde será consumida. Grande parte dos sistemas produtivos e serviços dos quais dependemos enquanto sociedade são totalmente dependentes dos sistemas de energia elétrica. Assim a qualidade e a continuidade do fornecimento de energia acabam por ter uma importância fundamental no modo de vida contemporâneo [Adibi 2000].

Este contexto faz com que a segurança em sistemas de potência cresça em importância a cada dia, assim como a utilização de métodos para identificar distúrbios e anomalias nos sistemas, para que ações de controle possam ser efetuadas, com a finalidade de proteger os sistemas de blecautes ou cortes, sendo este processo chamado de Análise de Segurança (AS). Basicamente os problemas que a análise de segurança em sistemas de potência se dispõe a resolver são:

1 – Identificar o estado de operação atual da rede (seguro, corretivamente seguro, alerta, emergência corrigível, emergência não corrigível e restaurativo).

2 – Identificar as possíveis evoluções do estado atual de operação, em um curto espaço de tempo [Stott 1987].

A Análise de Contingências é uma importante etapa na Análise de Segurança e encarregada de determinar qual a importância de cada equipamento dentro de uma rede. Ela consiste em identificar em uma lista de possíveis contingências, quais delas em caso de ocorrência levariam o sistema a um estado de operação não seguro [Srivani 2008]. Na análise de contingências são consideradas as linhas de transmissão, os transformadores, os bancos de reatores e capacitores, etc. Denomina-se contingência a saída de operação prevista ou imprevista de um ou mais equipamentos.

A seleção de contingências é uma etapa anterior à análise de contingências, onde sua função é gerar uma lista de possíveis contingências ordenada pela sua importância, desta forma sendo possível retirar desta lista contingências de menor importância e sem impactos ao sistema. Um método de seleção de contingências para ser eficiente deverá ter a capacidade de manter somente as contingências mais graves na lista, desta forma reduzindo a quantidade de verificações no processo de análise de contingências.

O problema da seleção de contingências, neste trabalho, é tratado como um problema de otimização combinatória, resolvido através do algoritmo meta-heurístico *Simulated Annealing* (SA). A principal contribuição deste trabalho é apresentar um método de seleção de contingências que seja robusto e eficiente na seleção de contingências múltiplas. Também é desejável que o algoritmo tenha as seguintes características:

1. Seleção de contingências múltiplas;
2. Seleção de contingências sob aspecto de violação do fluxo de potência ativa nas linhas de transmissão.
3. Exatidão na busca por contingências mais graves, avaliando reduzido espaço de soluções;
4. Não serem necessários cálculos *off-line*, facilitando o uso em redes com topologias dinâmicas.

O processo de Análise de Contingências consiste na determinação de um ponto de operação associado a cada contingência considerada. Para isso é necessário simular a saída de operação deste elemento, logo após é simulado o funcionamento do sistema sem o elemento avaliado, na sequência são calculadas possíveis violações, desconexões ou outro tipo de impacto que a rede possa sofrer com a retirada de tal equipamento e é determinado o referido ponto de operação.

Este trabalho está organizado da seguinte forma. A seguir, na seção 2, são apresentados conceitos básicos para o entendimento do problema e na seção 3 está a definição do mesmo. Na seção 4 constam detalhes sobre o algoritmo de SA empregado e na seção 5 estão detalhes da implementação do sistema proposto. Seguindo, na seção 6 podem-se ver os testes realizados e os resultados obtidos e por fim, na seção 7, o trabalho é concluído.

## 2. Conceitos Básicos

Nesta seção são apresentados alguns conceitos básicos do problema de Análise de segurança em sistemas de energia elétrica.

### 2.1 Análise de segurança

Sistemas elétricos são estruturas montadas com o objetivo de gerar e distribuir energia elétrica. São sistemas compostos por complexas redes fortemente conectadas por diversos equipamentos. Estas redes operam de forma síncrona em um equilíbrio dinâmico, adaptando a geração de energia as cargas existentes na rede. O controle destas redes é feito por centros de controle, que são estruturas onde engenheiros observam e controlam os sistemas elétricos, para manter a estabilidade e a segurança do sistema [Tomsovic 2005].

A tarefa de análise de segurança é umas das tarefas executadas pelos centros de controle, esta tarefa consiste na avaliação dos dados da rede para estimar seu estado de operação atual, bem como as possíveis evoluções deste estado [Balu 2002].

A análise de segurança divide-se em Análise Dinâmica e Análise Estática [Carpentier 1993]. Este trabalho está inserido na área da análise estática, onde são considerados sistemas de potência em equilíbrio.

### 2.2 Análise de Contingências

Contingência é a saída de operação de algum elemento da rede [Sudersan 2004]. Contingências podem ocorrer por problemas diversos, como atmosféricos, incêndios, erros humanos, falhas de equipamentos, entre outros [Almeida 2005]. As contingências podem ocorrer de forma simples ou múltipla, onde contingência múltipla é a saída de mais de um equipamento de operação.

A análise de contingências é o processo que analisa as possíveis contingências que podem levar o sistema a um estado de operação não seguro [Carpentier 1993]. Esta tarefa deve ser executada em curtos intervalos de tempo, e que demanda de um grande poder computacional pela sua complexidade. A tabela abaixo exhibe o crescimento do tamanho do problema para uma rede real com 810 barras de 1340 ramos.

1 contingência	-	1340 possíveis soluções a serem calculadas.
2 contingências	-	897.130 possíveis soluções a serem calculadas
3 contingências	-	400.119.980 possíveis soluções a serem calculadas.

Com este crescimento e as restrições de tempo impostas pelos centros de controle, mesmo com o crescimento do poder computacional dos últimos anos este problema continua a ser de difícil resolução.

Diferentes metodologias já foram abordadas para o problema, destacam-se o trabalho de classificação direta proposto em [Ejebe 1979], os que utilizam índice de performance como [Chen 1989], os que propõem métodos híbridos e meta-heurísticas como [Guerra 2002], [Sudersan 2004] e [Farias Costa 2011] e, ainda, aqueles que adotam as redes neurais [Devaraj 2002] e [Chakrabarti 2008].

### 2.3 Fluxo de Potência Desacoplado Rápido

O fluxo de potência desacoplado rápido (FCDR) [Stott 1973] é uma particularização do método de Newton-Raphson. Nele apenas as dependências entre a tensão e a potência ativa e entre a potência ativa e ângulo da tensão da barra são consideradas. É um método simples, confiável e eficiente para cálculo do fluxo de potência. Estas características o tornam viável para

o cálculo de contingências on-line em redes elétricas. As soluções de FCDR são bem aceitas como base para cálculos de índices de performance [Albuquerque 2005].

#### 2.4 Índice de performance

Um índice de performance é um escalar que reflete a severidade global dos efeitos de uma contingência [Chen 1989], seu objetivo na análise de segurança é mostrar o quão grave uma contingência pode ser. Um índice de performance é calculado geralmente como uma relação entre alguma grandeza elétrica e seu limite de operação no equipamento avaliado. Um coeficiente de variação é utilizado para que grandes violações sejam diferenciadas de conjuntos de pequenas violações, assim evitando mascaramentos.

### 3. Problema Enfocado

Conforme visto, o principal objetivo da análise de segurança em sistemas de potência é analisar os estados de operação dos sistemas e prever futuros estados, verificar se violações estão ocorrendo ou podem vir a ocorrer, estas informações são fundamentais para os centros de controle poderem planejar ações de controle ou prever situações que possam levar estas redes a estados de operação não seguros, estas ações visam evitar que os sistemas de potência possam atingir estados operacionais não seguros, evitando assim blecautes ou interrupções do fornecimento.

Neste trabalho, a seleção de contingências é o principal problema a ser considerado e para o qual foi feita uma modelagem matemática e foi aplicado o algoritmo metaheurístico *Simulated Annealing*, visto a alta complexidade do problema e esforço computacional exigido para sua resolução. A complexidade deste problema se deve a necessidade que para se determinar o valor do IP para cada elemento é necessário executar uma simulação de execução do sistema sem o elemento avaliado, desta forma quando o sistema avaliado chega a proporções maiores, como no caso de sistemas reais, aliados a possibilidade de mais de um elemento poder compor uma contingência, o número de simulações cresce exponencialmente. Como exemplo podemos citar uma rede com 810 barras 1340 ramos onde o número de simulações chega a 400.119.980 casos, para contingências triplas. Desta forma mesmo com o crescimento recente do poder computacional os métodos tradicionais não conseguem trazer resultados para uma operação *on-line*.

Os exíguos períodos de tempo para análise de segurança se deve ao fator que o atendimento das é dinâmico, a todo momento novas cargas podem entrar no sistema, assim como outras cargas podem sair do sistema, impactando em mudanças no *lay-out* de operação. Como exemplo, podemos citar uma rede onde tenha um bairro com uma indústria, que de forma hipotética podemos considerar que durante a jornada de trabalho a indústria está a plena atividade, consumindo a grande parte da energia disponível, e quando a jornada de trabalho chega ao fim, seus trabalhadores desligam os equipamentos e dirigem-se a suas casas, quando lâmpadas e outros equipamentos são acionados, este fato causa uma mudança no *lay-out* de atendimento da rede local. A complexidade do problema advinda do restrito tempo operacional determina a aplicação de algoritmos meta-heurísticos para sua resolução, lembrando que na literatura é possível encontrar problemas de diversas áreas onde foram comprovadas soluções com resultados adequados com a aplicação deste tipo de algoritmos.

Assim como em outras áreas da análise de sistemas de energia elétrica, o problema de seleção de contingências também pode ser subdividido em dois subproblemas: subproblema ativo e subproblema reativo. No contexto de verificação de segurança existe uma grande diferença entre os subproblemas ativo e reativo. O problema ativo consiste numa modelagem mais simples com menos variáveis, já o problema reativo exige uma modelagem mais complexa com maior número de variáveis associadas, isto torna o problema ainda mais complexo, sendo viável e desejável a aplicação de meta-heurísticas para solução do problema. Neste trabalho, apenas o aspecto ativo do problema de análise de segurança foi considerado.

O algoritmo meta-heurístico *Simulated Annealing* foi aplicado para resolver o problema da seleção de contingências mais graves, sob o ponto de violações nos limites de fluxo de potência ativa nos ramos (SAVFP, *Simulated Annealing* para o problema de Violação de Fluxo de Potência). O algoritmo *Simulated Annealing* é uma meta-heurística de busca em trajetória de fácil implementação e que já teve comprovada sua eficiência em diversos trabalhos. As características do algoritmo que faz uma busca em trajetória possibilitam que, pela característica do problema proposto, onde os sistemas de potência apresentam características de que uma grande quantidade de contingências não trarão grandes alterações aos sistemas, o mesmo seja adequado para aplicação. Uma importante característica de contingências em SEP é que quando ocorrem contingências podem ocorrer efeitos cascata, que é quando um elemento da rede sai de operação por algum motivo acaba impactando também nos equipamentos interligados a este, esta característica pode fazer que algoritmos que a utilização de conceitos de vizinhança possa levar a soluções ótimas para o problema.

No processo de análise das contingências os limites operacionais normalmente levados em conta são as sobrecargas nas linhas de transmissão, transformadores e em sobre e subtensões nos barramentos [Guerra 2002]. Caso sejam detectadas violações após a ocorrência de certa contingência, três tipos de ações podem ser tomadas pelo operador: 1) desenvolver uma ação corretiva que será utilizada caso a contingência venha a ocorrer. 2) desenvolver uma estratégia preventiva e implementá-la imediatamente, de modo que a contingência passe a não provocar violações. 3) nada fazer, já que contingências são um fato pouco comum, e é provável que o estado de operação da rede seja diferente no momento que ela ocorra. [Albuquerque 2003].

Após o cálculo da tarefa de análise de contingências é possível saber onde ficam os pontos mais críticos da rede para um dado *lay-out* de operação, o que facilita aos operadores a prevenção de problemas ou estudos de estratégias preventivas. Como os *layouts* de operação sofrem constantes alterações esta análise precisa ser refeita a cada mudança, isto torna necessários que os algoritmos tragam resultados em um curto espaço de tempo, sendo ideal que este resultado seja um ótimo global.

Grande parte dos trabalhos relacionados à análise de segurança em sistemas de potência leva em consideração a violação no fluxo de potência ativa e também a violação de tensão em barras, de forma que quando um destes problemas for resolvido o método pode ter sua fórmula da função objetivo adaptada para a solução do outro método, isto se dá pela similaridade na modelagem dos dois problemas.

Independentemente de qual aspecto do problema está sendo considerado, estático ou dinâmico, utiliza-se normalmente o conceito de Índice de Performance (IP), para a quantificação de efeitos de contingência. Uma formulação geral [Farias Costa 2011] é definida pela expressão:

$$IP = \sum w_j |f_j(x)|^m \quad (1)$$

O índice de performance é calculado para determinado item da rede, este índice de performance quantifica a importância em determinado item da rede para o estado atual, após ser calculado o índice de performance para todos itens da rede em operação, é possível fazer uma classificação de quais elementos da rede são os mais importantes, sendo estes que devem ter maior atenção dos operadores do sistema.

Na execução do algoritmo *Simulated Annealing* com o objetivo de encontrar contingências mais importantes nos sistemas de potência analisados, inicia-se com uma solução inicial selecionada por alguma heurística simples. (Em algoritmos meta-heurísticos uma solução inicial adequada pode reduzir significativamente o tempo de processamento da meta-heurística em sua busca por um ótimo global.) A partir da solução inicial são feitos movimentos buscando uma solução de contingência vizinha a contingência inicial, definida a contingência vizinha, verificações de violações são executadas, não ocorrendo divergência no cálculo do FCDR, tem-se um novo ponto de operação da rede (sem os ramos da contingência analisada). Após, o cálculo de IP é executado, quando isso é finalizado o algoritmo aceita o resultado caso haja uma melhora ao resultado anterior ou não ocorrendo melhora, a fórmula do critério de aceitação é

analisada podendo ou não ser aceita, caso seja aceita o resultado é movido para a solução atual calculada. Na Figura 1 a seguir vê-se o fluxograma de execução do algoritmo de *Simulated Annealing* para o problema de seleção de contingências.

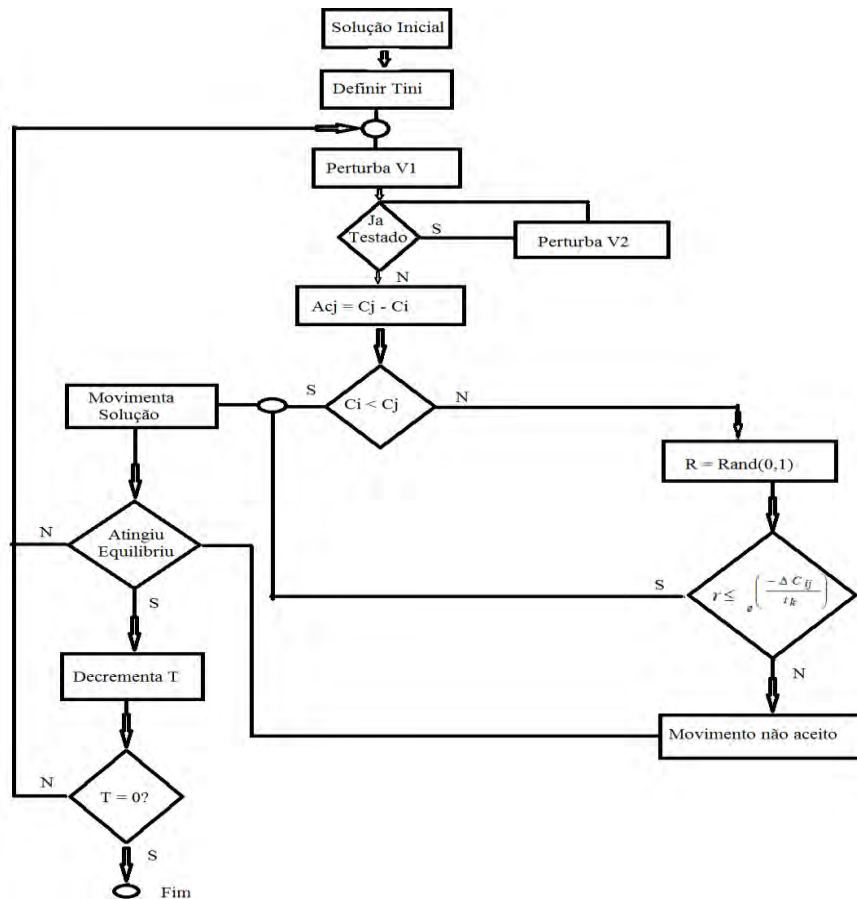


Figura 1: Aplicação de *Simulated Annealing* para Análise de Segurança

#### 4. Algoritmo utilizado

*Simulated Annealing* é um método probabilístico de busca em trajetória proposto por Kirkpatrick, Gelatt e Vecchi em 1983 para busca de mínimos locais de uma função custo. O algoritmo simula um processo físico no qual um sólido é aquecido e lentamente resfriado até sua temperatura mínima, representando o estado de menor energia. Pertence a classe de algoritmos de busca e trajetória, conhecidos como algoritmos de limiarização (ou de aceitação). Este algoritmo é largamente usado por possibilitar que o processo de busca escape de ótimos locais [Pailla 2010]. O algoritmo transporta o processo de acomodação para a solução do problema de otimização. A função objetivo do problema é simular a energia dos materiais, após o aquecimento a temperatura é então reduzida, pela introdução de uma temperatura fictícia  $T$ , que é um simples parâmetro controlado pelo algoritmo.

O algoritmo inicia pela geração de uma solução inicial (gerada randomicamente ou por algum método heurístico), o parâmetro da temperatura com  $T$  também é inicializado. Na sequência a cada iteração a solução  $s'$  é randomicamente selecionada na vizinhança  $N(s)$  da solução atual  $s$ . A solução escolhida é aceita como nova solução dependendo de  $T$  e dos valores da função objetivo  $s'$  e  $s$ , definida por  $f(s')$  e  $f(s)$  respectivamente. Se  $f(s') \leq f(s)$ , então  $s'$  é aceito como  $s$ . De outra forma, se  $f(s') > f(s)$ ,  $s'$  pode ser aceito com a probabilidade expressa pela fórmula 2

$$p(T, f(s'), f(s)) = \exp\left(-\frac{f(s') - f(s)}{T}\right) \quad (2)$$

Onde:

$T$  = temperatura do sistema,

$s$  = solução atual,

$s'$  = nova solução para avaliação,

$f(s)$  = valor da função objetivo de  $s$ .

## 5. Sistema Proposto

A implementação computacional foi desenvolvida em C#, com interface do usuário por linha de comando conhecida como “CLI”. Inicialmente o projeto carrega todos os dados da rede a ser analisada a partir um arquivo do tipo *dat*, este arquivo contém as informações sobre o *lay-out* da rede colocando toda configuração da rede em memória assim podendo utilizar as informações para execução do algoritmo de SA.

Durante a execução do algoritmo de SA é necessária a execução de um aplicativo externo desenvolvido em [Canto dos Santos, 1998] que executa a análise de fluxo de potência por FCDR, sendo este o responsável pela geração dos arquivos contendo os dados de saída do fluxo de potência para a rede analisada, este arquivo de saída também é carregado para a memória do algoritmo de SA completando as informações necessárias para o algoritmo de SA fazer suas buscas em trajetória atrás de um ótimo global.

Os métodos de geração de vizinhança foram adaptados com base nos métodos tradicionais do algoritmo de SA, que são de adição, deleção e troca. Estes métodos foram adaptados para que as trocas aconteçam por ramos adjacentes à contingência atual, desta forma vizinhos próximos são analisados primeiro, caso não sejam encontrados novos vizinhos o método faz trocas aleatórias para perturbar a solução.

Uma melhoria que foi adaptada no algoritmo para que este não repita chamadas para o aplicativo externo de cálculo de fluxo de potência repetidas vezes para um mesmo patamar de temperatura, foi criar uma estrutura de memória que mantém os ramos que já foram calculados para aquele patamar de temperatura, evitando que o cálculo do fluxo de potência se repita, para aquele patamar de temperatura. Caso não haja novos vizinhos para visitar, o algoritmo pode escolher uma opção aleatória de resultados, esta opção pode ajudar o algoritmo meta-heurístico a fugir de possíveis ótimos locais.

Após a seleção de um resultado de vizinhança, esta é selecionada e é retirada da estrutura atual da rede, neste momento é executada uma nova chamada para o fluxo de potência por FCDR, os resultados são carregados para a rede e o cálculo do IP para o ramo é executado, desta forma temos o valor de IP para a vizinhança avaliada e assim temos como avaliar a importância do ramo para o atual *lay-out* do sistema.

Posteriormente a avaliação de uma vizinhança e o cálculo do valor do IP para aquele movimento o algoritmo avalia este resultado, que é aceito caso traga melhora na função objetivo atual, fazendo o movimento para este resultado, ou o algoritmo chama a função de critério de avaliação, onde um resultado de piora é avaliado. Caso a fórmula do critério de aceitação permita que o movimento seja aceito, a solução move-se para esta solução, caso contrário é mantida a solução atual e o algoritmo inicia a busca por uma nova vizinhança.

Como o algoritmo de SA trabalha armazenando sempre o melhor resultado e é necessário uma lista dos ramos mais importantes, uma lista em memória foi criada para armazenamento desta informação, cujo tamanho é definido por parametrização. Nesta lista são armazenados os melhores resultados encontrados durante o processamento do algoritmo, desta forma, toda vez que uma nova solução é aceita, um método que avalia o resultado atual dentre todos os armazenados na lista. Caso a solução seja melhor do que algum resultado contido na lista, o resultado menos importante da lista é removido e inserido este novo resultado, desta

forma a lista sempre fica atualizada com os melhores resultados encontrados durante o processamento, e esta lista no final pode ser consultada para avaliação.

Outro detalhe é que para cada análise realizada é utilizada uma única configuração de rede. Neste trabalho já foi demonstrado que o *lay-out* da rede é dinâmico, e estas informações de novos *lay-outs* chegam geralmente em intervalos de alguns minutos, tempo este que normalmente é o limite de processamento para a análise de segurança.

## 6. Testes e resultados

Para validação dos resultados foi utilizado o método de taxa de captura. Taxa de captura (TC) é um escalar que mede o quanto um método de seleção é efetivo em retornar as contingências mais severas em comparação a algum outro método estabelecido, normalmente o método clássico, que é exato. Para obter a taxa de captura, as listas de contingências mais severas retornadas pelos métodos são comparadas [Quintela, 2002] e [Albuquerque, 2005].

A formulação da taxa de captura é expressa por:

$$Tc = \frac{K(P)}{N} \cdot 100 \quad (3)$$

Onde:

- Tc: taxa de captura,
- N: quantidade de contingências severas que se deseja capturar,
- P: posições tomadas da lista de contingências classificadas pelo método,
- K: contingências que parecem nas P posições iniciais da lista.

Os resultados obtidos neste trabalho foram comparados aos resultados obtidos pelo método exato, executado através do sistema ANAREDE® desenvolvido pelo CEPTEL. As mesmas instâncias de testes foram executadas nos dois métodos. A lista com as contingências mais importantes encontradas pelo método clássico foi comparada com os resultados obtidos pela aplicação do algoritmo de SA, determinando-se assim o valor da taxa de captura obtido pelo algoritmo deste trabalho. Os valores obtidos pelo algoritmo SA foram calculados através da média dos resultados obtidos em 100 execuções.

Os parâmetros do algoritmo foram obtidos de forma empírica e para avaliação no processo foram analisados resultados de 30 execuções. Os parâmetros que variaram para o processo de sintonia do algoritmo foram:

1. Temperatura inicial,
2. Número de iterações por patamar de temperatura,
3. Velocidade de resfriamento ( $\alpha$ ),
4. Número de re-aquecimentos.

A parametrização que obteve melhores resultados entre eficiência e eficácia foi utilizada para execução dos testes, tendo sido adaptado apenas o tamanho das instâncias.

O espaço de busca pode ser entendido como o conjunto de todos os valores possíveis para as variáveis de decisão de um problema [Pailla, 2010]. Neste trabalho o espaço de busca é considerado o conjunto de todas as contingências, simples ou duplas, de ramo possíveis. O percentual de varredura identifica quantas soluções dentre as possíveis foram testadas. Quanto menor o percentual, maior a eficiência.

Para o sistema IEEE30 existem ao todo 820 combinações de contingências duplas ( $k=2$ ). Após a execução de uma seção de *tunning* foram obtidos os parâmetros vistos na Tabela 1, foram executadas 100 repetições gerando os resultados de taxa de captura e o percentual do espaço de busca pesquisado pelo algoritmo. Estas informações são demonstradas na Tabela 2.

Também foram realizados testes para contingências simples e duplas para uma rede real de 810 barras e 1340 ramos. Os resultados, a exemplo do sistema teste IEEE 30, foram satisfatórios e serão apresentados durante o Simpósio.



Parâmetro	Valor
Número de iterações	13
Tamanho Lista de resultados	5
Velocidade de resfriamento ( $\alpha$ )	0,85
Re annealing	0
Temperatura inicial	50

Tabela 1: Parâmetros de execução do SA

Resultados	
Média da taxa de captura	89,40%
Vezes em que foi encontrada a contingência mais grave	98
Percentual médio de varredura	38,04%
Tempo Execução (desvio padrão de 3s)	7s

Tabela 2: Resultados para contingências duplas no sistema IEEE 30.

## 7. Conclusão

O funcionamento adequado de um sistema de energia elétrica depende da execução correta, nos centros de controle dos sistemas, da tarefa análise de segurança. A avaliação em tempo real de todas as contingências possíveis em sistemas de grande porte é impraticável. Dadas às severas restrições de tempo e recursos, diversas abordagens foram elaboradas e testadas nas últimas décadas. Eficiência, confiabilidade e tolerância a mudanças na topologia da rede são questões difíceis de serem contempladas por um método único.

Neste trabalho, o problema de seleção de contingências foi modelado como um problema de otimização combinatória resolvido pela aplicação do algoritmo de *Simulated Annealing*. Este método foi escolhido pela capacidade de algoritmo metaheurístico varrer espaços de busca não lineares e não convexos, no intuito de localizar boas soluções para problemas de grande porte. Para manter a confiabilidade e eficiência na seleção de contingências o método do FCDR foi escolhido para a tarefa de cálculo do fluxo de potência, método já utilizado em outros trabalhos propostos para o problema enfocado.

Embora resultados satisfatórios tenham sido obtidos, há espaço para melhorias em trabalhos futuros. A aplicação do algoritmo para o problema de violação de tensão nas barras também deve ser executada, assim como melhorias nos métodos de busca ou, ainda, a combinação do algoritmo de *Simulated Annealing* com outro tipo de metaheurística, originando assim um sistema híbrido.

## Referências

- Aarts, E.; Lenstra, J. K.** Local search in combinatorial optimization. New Jersey, EUA: Princeton University Press, 2003
- Adibi, M. M.** (2000). Methodologies and Implementation. POWER SYSTEM RESTORATION ISSUES - IEEE Power System Restoration Book , 31-36.
- Albuquerque, M. D. A.**, Seleção de contingências com relação a estabilidade de tensão para análise de segurança em tempo real, Dissertação de mestrado, UNICAMP, 2005.

**Almeida, S. e Pestana, R.** (2005), Definição e análise de contingências severas na Rede Eléctrica Portuguesa, 9º Congresso Hispano-Luso de Engenharia Electrotécnica, 1-9.

**Balu, N., et al.** (1992), On-Line Power System Security Analysis. Proceedings of IEEE, Vol.80, 262-280.

**Bertsimas D. Tsitsiklis J.** , 1993 – Simulated Annealing, Statistical Science Vol 8. No. 1, 10-15.

**Canto dos Santos, J. V.** (6 de 9 de 1998). Tratamiento de Contingencias que Causan Desconexiones en Sistemas de Potencia. Información Tecnológica (Impresa) La Serena - Chile, pp. 205-210.

**Carpentier, J.** (1993), Static Security Assessment and Control: A Short Survey, "Planning, Operation and Control of Today's Electric Power Systems", 1-9. Cepel, ANAREDE V08/Ago04–Manual do usuário. Brasil. 2004.

**Chakrabarti, S. e Jeyasurya, B.** (2008), Multicontingency voltage stability monitoring of a power system using an adaptive radial basis function network, Electrical Power and Energy Systems, 30, 1-7.

**Chen, Y. e Bose, A.** (1989), Direct Ranking for Voltage Contingency Selection, IEEE Transactions on Power Systems, 4, 1335-1344.

**Devaraj, D., Yegnanarayana, B. e Ramar, K.** (2002), Radial basis function networks for fast contingency ranking, Electrical Power and Energy Systems, 24, 387-395.

**Ejebe, G. C. e Wollenburg, B. F.** (1979), Automatic contingency selection. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 97-103. 1148 September 24-28, 2012 Rio de Janeiro, Brazil

**Farias Costa, I.** (2011). ALGORITMO GENÉTICO PARA SELEÇÃO DE CONTINGÊNCIAS NA ANÁLISE ESTÁTICA DE SEGURANÇA EM REDES ELÉTRICAS. . Dissertação de Mestrado. S. Leopoldo, RS, BR: UNISINOS.

**Guerra, A. F.**, Seleção de contingências para violações de MW em ramos de sistemas elétricos de potência utilizando abordagem multinível adaptativa, Tese de Mestrado, UNICAMP, 2002.

**Pailla A, Trindade AR, Parada V, et al.** (2010) A numerical comparison between simulated annealing and evolutionary approaches to the cell formation problem. Expert systems with Application 37: 5476-5483.

**Quintela, A.**, Estudo de índices de proximidade ao limite de estabilidade de tensão e aplicação na seleção de contingências, Dissertação de mestrado, UNICAMP, 2002.

**Srivani, J. e Swarup, K. S.** (2008), Power system static security assessment and evaluation using external system equivalents, Electrical Power and Energy Systems, 30, 83-92.

**Stott, B. e Alsac, O.** (1973), Fast Decoupled Load Flow. IEEE PES Summer Meeting & EHV/UHV Conference, 859-868.

**Stott, B., Alsac, O., e Monticelli, A.** (1987), Security Analysis and Optimization. Proceedings of the IEEE, 1623-1644.

**Sudersan, A., Abdelrahman, M. e Radman, G.** (2004), Contingency Selection and Static

Security Enhancement in Power Systems using Heuristics-based Genetic Algorithms.  
Proceedings of the Thirty-Sixth Southeastern Symposium on System Theory, 556-560.

**Tomsovic, K.** (2005), Designing the Next Generation of Real-Time Control, Communication, and Computations for Large Power Systems. Proceedings of the IEEE. 93, 965-979.  
*l*, 32:5-44.