



Programa Interdisciplinar de Pós-Graduação em  
**Computação Aplicada**  
Mestrado Acadêmico

Fausto Stefanello Tomazi

Implementação do Algoritmo Metaheurístico *Simulated Annealing* para o Problema de Seleção de Contingências em Análise de Segurança de Redes Elétricas

São Leopoldo, 2016

UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS  
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA INTERDISCIPLINAR DE PÓS-GRADUAÇÃO  
EM COMPUTAÇÃO APLICADA  
NÍVEL MESTRADO

Fausto Stefanello Tomazi

**IMPLEMENTAÇÃO DO ALGORITMO METAHEURÍSTICO  
*SIMULATED ANNEALING* PARA O PROBLEMA DE SELEÇÃO DE  
CONTINGÊNCIAS EM ANÁLISE DE SEGURANÇA DE REDES  
ELÉTRICAS**

São Leopoldo  
2016

Fausto Stefanello Tomazi

**IMPLEMENTAÇÃO DO ALGORITMO METAHEURÍSTICO  
*SIMULATED ANNEALING* PARA O PROBLEMA DE SELEÇÃO DE  
CONTINGÊNCIAS EM ANÁLISE DE SEGURANÇA DE REDES  
ELÉTRICAS**

Dissertação apresentada ao Programa Interdisciplinar de Pós-Graduação em Computação Aplicada da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS.

Orientador: Dr. José Vicente Canto dos Santos

São Leopoldo  
2016

T655d

Tomazi, Fausto Stefanelo

Implementação de algoritmo metaheurístico simulated annealing para problema de seleção de contingência em análise de segurança de redes elétricas./ por Fausto Stefanelo Tomazi – 2016.

84 f.: il., 30cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa Interdisciplinar de Pós-Graduação em Computação Aplicada, 2016.

Orientação: Dr. José Vicente Canto dos Santos

1.Sistemas elétricos de potência 2. Algoritmos metaheurísticos 3. Otimização Estocástica 4.Sistema de redes I. Santos, José Vicente Canto dos II. Título

CDU: 004.021

Fausto Stefanello Tomazi

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

Dissertação apresentada à Universidade do Vale do Rio dos Sinos – Unisinos, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Computação Aplicada.

Aprovado em 23 de setembro de 2016.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Arthur T. Gómez - UNISINOS

---

Prof. Dr. Leonardo D. Chiwiacowsky - UCS

---

Prof. Dr. José Vicente Canto dos Santos - UNISINOS

Prof. Dr. José Vicente Canto dos Santos

Visto e permitida a impressão  
São Leopoldo,

Prof. Dr. Sandro José Rigo  
Coordenador PPG em Computação Aplicada

*Dedico este trabalho a minha família,  
em especial meus pais Clarinda e  
José Antonio. Se hoje cheguei até  
aqui foi devido ao apoio  
incondicional destes.*

## **AGRADECIMENTOS**

*Gostaria de deixar os meus agradecimentos ao apoio dado por meus pais em todos os momentos.*

*Agradeço ao meu orientador que sempre dispôs de seu tempo para a minha instrução e colaboração para que este projeto tenha seguido em desenvolvimento.*

*Também agradeço ao Instituto de Pesquisas Eldorado pelo apoio dado neste trabalho.*

## RESUMO

Os sistemas de potência desempenham um papel fundamental na economia de uma nação, fornecendo energia elétrica com qualidade e sem interrupções a população. Para que isto seja possível grandes investimentos no setor são aplicados para garantir o fornecimento. No entanto, qualquer equipamento está sujeito a falhas, e analisar o impacto que falhas em equipamento afetam o fornecimento é uma das tarefas executadas pelos centros de controle, chamada de Análise de Segurança. Desta forma, os centros de controle são responsáveis por realizar planos de contingência para que em caso de algum equipamento saia de operação o impacto sofrido pela rede seja o menor possível. Uma importante tarefa da Análise de Segurança é a Seleção de Contingências. Esta tarefa sendo encarregada de selecionar os equipamentos mais importantes do sistema para que a tarefa de Análise de Segurança possa criar planos de prevenção caso os respectivos equipamentos saiam de operação. Os grandes sistemas elétricos existentes hoje são compostos de milhares de equipamentos, e uma análise mais detalhada para cada equipamento é algo de difícil resolução, sendo neste cenário que a seleção de contingência ganha importância. A Seleção de Contingência é encarregada de buscar e classificar as restrições mais importantes da rede, porém para redes de grande porte com milhares de itens, analisar o impacto de cada item é uma tarefa que pode levar muito tempo, não permitindo que o cálculo seja efetuado durante a operação do sistema. Desta forma faz-se necessário executar a Seleção de Contingências de forma eficiente e eficaz. Este estudo propõe o desenvolvimento do algoritmo metaheurístico de *Simulated Annealing* a fim de que a seleção de contingência seja executada de forma que atenda todas as restrições de tempo impostas pelos centros de controle. Nos experimentos é possível verificar que após uma sintonia de parâmetros para a instancia do problema abordado, os resultados encontrados atende as restrições dos centros de controle e também é possível visualizar que os resultados são ligeiramente melhores que resultados de trabalhos encontrados na literatura, onde o mesmo problema é abordado pela metaheurística do Algoritmo Genético.

**Palavras-Chave:** *Simulated Annealing*. Análise de Segurança. Metaheurística. Sistemas de potência. Análise de Segurança. Fluxo de Potência.

## ABSTRACT

Power systems play a key role in a nation's economy by providing quality, uninterrupted power to the population. For this to be possible large investments in the sector are applied to guarantee the supply. However, any equipment is subject to failures, and analyzing the impact that equipment failures affect supply is one of the tasks performed by control centers, called Safety Analysis. In this way, the control centers are responsible for carrying out contingency plans so that in the event of any equipment leaving the operation the impact suffered by the network is as small as possible. An important task of Security Analysis is the Selection of Contingencies. This task is in charge of selecting the most important equipment in the system so that the Security Analysis task can create prevention plans if the respective equipment goes out of operation. The large electrical systems that exist today are made up of thousands of equipment, and a more detailed analysis for each equipment is difficult to solve, and in this scenario contingency selection is important. The Contingency Selection is responsible for searching and classifying the most important restrictions of the network, but for large networks with thousands of items, analyzing the impact of each item is a task that can take a long time, not allowing the calculation to be performed During system operation. In this way it is necessary to perform the Contingency Selection efficiently and effectively. This study proposes the development of the metaheuristic algorithm of Simulated Annealing in order that the contingency selection is performed in a way that meets all the time constraints imposed by the control centers. In the experiments it is possible to verify that after a tuning of parameters for the instance of the problem approached, the results found meets the control center constraints and it is also possible to visualize that the results are slightly better than results of works found in the literature, where the same Problem is addressed by the metaheuristic of the Genetic Algorithm.

**Keywords:** Simulated Annealing. Security analysis. Metaheuristic. Grid power systems. Security of power systems

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Exemplo da rede utilizada para testes, IEEE – 14.....	19
Figura 2: Fluxograma do processo de Análise de Segurança. ....	26
Figura 3: Trajetória típica em um algoritmo de busca <i>Simulated Annealing</i> . ....	31
Figura 4: Exemplo de um pseudo algoritmo de <i>Simulated Annealing</i> . ....	32
Figura 5: Fluxo de um algoritmo de <i>Simulated Annealing</i> . ....	34
Figura 6: Rede base e seus limites de operação. ....	39
Figura 7: Fluxo de potência atendido pela rede, demonstrado por $F$ . ....	39
Figura 8: Fluxo de potência para a contingência do ramo entre vértices 1 e 2.....	40
Figura 9: Fluxo de potência para a contingência do ramo entre vértices 1 e 3.....	40
Figura 10: Fluxo de potência para a contingência do ramo entre vértices 2 e 3.....	41
Figura 11: Exemplo de geração de vizinhança para 2 níveis.....	44
Figura 12: Comparação utilizando método da taxa de captura.....	47
Figura 13: Fluxograma de Seleção de Contingências pelo método SA.....	51

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Dados de barras da rede exemplo. ....	38
Tabela 2: Dados dos ramos da rede exemplo. ....	39
Tabela 3: Fluxo de potência na rede sem restrição. ....	39
Tabela 4: Dados do fluxo após contingência do ramo 1-2. ....	40
Tabela 5: Fluxo de potência para restrição do ramo 1-3. ....	40
Tabela 6: Fluxo de potência para restrição do ramo 2-3. ....	41
Tabela 7: Resultado sobre contingências mais importantes para rede. ....	41
Tabela 8: Resultados para $K=1$ obtidos via método clássico. ....	52
Tabela 9: Parâmetros e respectivos resultados IEEE30 e $K=1$ . ....	53
Tabela 10: Análise dos resultados, rede IEEE30 com $K=1$ . ....	53
Tabela 11: Parâmetros de teste. ....	55
Tabela 12: Parametrização do SA para rede IEEE30 com $K=2$ . ....	56
Tabela 13: Resultados obtidos para rede IEEE30 em $K=2$ . ....	56
Tabela 14: Tabela de parâmetros de SA para execução de testes. ....	58
Tabela 15: Parâmetros do SA para rede 810 em $K=1$ . ....	58
Tabela 16: Resultados obtidos para cada parametrização. ....	59
Tabela 17: Análise dos resultados para rede 810 barras. ....	60
Tabela 18: Parâmetros dos testes na rede 810 em $K=2$ . ....	63
Tabela 19: Resultados dos testes na rede 810 para $K=2$ . ....	63
Tabela 20: Dados normalizados rede 810 em $K=2$ . ....	63
Tabela 21: Cem execuções do caso 1 para rede 810 $k=2$ . ....	64

## LISTA DE ABREVIATURAS

SEP	Sistemas Eléctricos de Potência
SA	<i>Simulated Annealing</i>
AE	Análise Estática
AD	Análise Dinâmica
AGFI	Algoritmo Genético para Fluxo de Potência
FB	Fluxo Básico
IP	Índice de Performance
FCDR	Fluxo de Potência Desacoplado Rápido
SAVFP	<i>Simulated Annealing</i> para o problema de Violação de Fluxo de Potência

## LISTA DE SIGLAS

CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
ANAREDE	Sistema para Análise de Redes
PIPCA	Programa Interdisciplinar de Pós-Graduação em Computação Aplicada
UNISINOS	Universidade do Vale do Rio dos Sinos
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>
FO	Função Objetivo

## LISTA DE SÍMBOLOS

$T_{ini}$	Temperatura inicial
$K$	Número de componentes de uma contingência
$F$	Fluxo de potência
$r$	Número gerado aleatoriamente

## Sumário

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
<b>1.1 Objetivos .....</b>	<b>16</b>
<b>2 ANÁLISE DE SEGURANÇA EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA .....</b>	<b>19</b>
<b>2.1 Conceitos Básicos em Sistemas Elétricos de Potência .....</b>	<b>19</b>
2.1.1 Fluxo de Potência em SEP .....	20
<b>2.2 Análise de Segurança .....</b>	<b>21</b>
2.2.1 Análise Dinâmica em SEP .....	22
2.2.2 Análise Estática em SEP .....	22
2.2.3 Estados de Operação.....	23
2.2.4 Índice de Performance .....	23
<b>2.3 Centros de Controle e Operação .....</b>	<b>24</b>
<b>2.4 Seleção de Contingências e Análise de Contingências.....</b>	<b>25</b>
<b>2.5 Revisão de literatura .....</b>	<b>27</b>
<b>3 CONCEITOS BÁSICOS SOBRE METAHEURÍSTICAS .....</b>	<b>29</b>
<b>3.1 Otimização .....</b>	<b>29</b>
3.1.1 Otimização Estocástica .....	29
<b>3.2 Algoritmos Metaheurísticos .....</b>	<b>30</b>
<b>3.3 <i>Simulated Annealing</i>.....</b>	<b>30</b>
3.3.1 Estruturas de Vizinhança .....	35
<b>4 METODOLOGIA .....</b>	<b>37</b>
<b>4.1 Aspectos Básicos do Projeto de Programação .....</b>	<b>37</b>
<b>4.2 Índices de Performance para Função Objetivo do Problema.....</b>	<b>38</b>
<b>4.3 Solução Inicial para o algoritmo de <i>Simulated Annealing</i>.....</b>	<b>42</b>
<b>4.4 Geração da vizinhança do SA.....</b>	<b>42</b>
<b>4.5 Definição dos parâmetros para SA .....</b>	<b>44</b>
<b>4.6 Critério de Parada .....</b>	<b>45</b>
<b>4.7 <i>Reannealing</i> .....</b>	<b>46</b>
<b>4.8 Validação dos Resultados.....</b>	<b>46</b>
4.8.1 Taxa de captura .....	46
<b>5 TESTES E RESULTADOS .....</b>	<b>49</b>
<b>5.1 Detalhes da implementação .....</b>	<b>49</b>
<b>5.2 Resultados para rede IEEE30 .....</b>	<b>51</b>
5.2.1 Testes para instância IEEE30 $K=1$ .....	52
5.2.2 Testes para instância IEEE30 $K=2$ .....	55
<b>5.3 Resultados para a rede real Sul Brasileira com 810 barras para <math>K=1</math> .....</b>	<b>57</b>
<b>5.4 Resultados para a rede real Sul Brasileira 810, para <math>K=2</math>.....</b>	<b>62</b>
<b>5.5 Comparação entre os resultados obtidos pelo SAVFP e por Algoritmo Genético para o problema de Seleção de Contingências .....</b>	<b>65</b>
<b>6 CONCLUSÃO .....</b>	<b>66</b>
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>68</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Nos dias atuais, a energia elétrica é um recurso indispensável para o desenvolvimento, sendo um dos principais itens que compõem indicadores de desenvolvimento social e econômico. Para que a energia elétrica chegue ao consumidor final é necessário que sistemas de geração transmissão e distribuição sejam interconectados, esses sistemas compõem chamados de Sistemas Elétricos de Potência (SEP), basicamente encarregados de levar a energia elétrica das fontes geradoras até os locais onde é consumida. Neste contexto, é de fácil compreensão a real importância dos sistemas de potência na atualidade.

O atual modo de vida moderno assim como os atuais sistemas produtivos, são totalmente dependentes dos sistemas de energia elétrica, desta forma manter a qualidade e continuidade dos sistemas cresce em importância para que interrupções no fornecimento não impactem na qualidade de vida ou cause interrupções em sistemas produtivos (ADIBI, 2000). Inserida neste contexto, a análise de segurança em sistemas de potência cresce em importância a cada dia, através do uso de métodos para identificar possíveis distúrbios e proteger a rede dos mesmos com ações de comando executados pelos centros de controle com a importância de manter a segurança das redes de potência. Blecautes podem ser evitados se contingências graves forem identificadas de forma ágil e ações de controle forem tomadas para sua contenção, tanto do ponto de vista ativo quanto reativo.

A tarefa de análise de segurança estática em redes de fornecimento de energia é encarregada de definir a importância que cada elemento tem na operação de uma rede em determinado estado, visando a não ocorrência de interrupções no sistema por falha ou parada de um ou mais equipamentos. Esta análise é feita considerando os componentes mais importantes da rede, tais como: linhas de transmissão, transformadores, barras, banco de reatores e capacitores (KUMAR, 2011), (ALBUQUERQUE, 2005), (FARIAS COSTA, 2011), (GERHARDT, 2007). Grande parte dos trabalhos encontrados na literatura buscam analisar itens mais importantes como transformadores linhas de transmissão e barras (FARIAS COSTA, 2011), (GERHARDT, 2007), (CHIEN, CHENG, CHOU, & LIU, 2007). A tarefa de saber quais são os elementos mais críticos na rede é garantir a prioridade de atenção na operação, para que o sistema não saia do estado seguro caso algum componente pare de funcionar.

Contingência é a saída de operação prevista ou não de um ou mais equipamentos. A tarefa de análise de contingência é uma das tarefas executadas pelos centros de controle como parte da tarefa de análise de segurança, onde a análise de contingência é encarregada de estudar detalhadamente o impacto sofrido pela rede em possíveis contingências.

A tarefa de seleção de contingências é importante no processo de análise de contingência, sendo encarregada de fornecer uma lista com as contingências mais graves. A tarefa de seleção de contingências ganha importância pelo fato de que a maioria das contingências não causam grandes impactos a segurança do sistema. Dado o tamanho dos sistemas elétricos de potência e as severas restrições de tempo impostas aos centros de controle, é proibitiva a exaustiva análise de todas possíveis contingências do sistema em tempo real.

No processo de seleção de contingências, um dos métodos define a necessidade que cada elemento seja avaliado e receba um escalar que serve para sua classificação, sendo que esse escalar é calculado através do método que executa o fluxo de carga para a rede sem os equipamentos de uma possível contingência. O resultado é o impacto que a rede sofre pela contingência analisada. O impacto provocado por essa contingência é conhecido e ao final do

teste de cada caso, têm-se uma lista de contingências sendo possível a classificação por ordem de importâncias, assim podendo ser claramente visualizado (MONTICELLI, 1983).

Quando temos a necessidade de executarmos o processo de análise de contingências para sistemas reais, enfrentamos diversas características que tornam a execução inviável de ser executada devido as restrições. As características do sistema que tornam viável a adoção de métodos aproximados são:

- Redes reais podem atingir tamanhos relativamente grandes, onde é possível que milhares de equipamentos façam parte dos sistemas;
- A análise de segurança *on-line* deve ser executada ciclicamente durante a operação do sistema, sendo de grande importância que toda a análise de segurança seja recalculada em intervalos de no máximo meia hora;
- É real a possibilidade de mais de um equipamento sair de operação simultaneamente, exigindo que a análise seja executada para mais de um equipamento combinado, causando o crescimento do problema de forma combinatória;
- É importante que os resultados sejam obtidos rapidamente, pois após conhecer as possíveis contingências mais importantes é necessário planejar manobras de chaveamento e planos de contenção para manter o sistema operando em modo seguro.

Devido a essas características surge a necessidade de a utilização de métodos aproximados, porém que sejam confiáveis e eficientes para a solução do problema. Visto a grande importância, alguns autores (EJEBE, 1979), (CARPENTIER, 1993), (DEVARAJ, 2002) (GERHARDT, 2007) (FARIAS COSTA, 2011) (KUMAR, 2011) aplicaram diversas técnicas para a seleção de contingências mais graves, e outros já utilizam técnicas de otimização para o problema enfocado, tais como (BOUSSAID, 2013) (MOUSTAFA, 2014).

Neste trabalho, é desenvolvido um algoritmo de *Simulated Annealing* (SA) para o problema de seleção de contingências mais graves sob o ponto de vista de violação no fluxo de potência nas linhas de transmissão. A escolha do algoritmo de *Simulated Annealing* é baseada em algumas características do algoritmo como o fato, de que a cada iteração, somente uma solução é visitada, a garantia de convergência e a capacidade do algoritmo em fugir de ótimos locais, assim como algumas outras que serão melhor detalhadas ao longo do trabalho.

## 1.1 Objetivos

Neste trabalho, o problema de seleção de contingências é abordado como um problema de otimização combinatória, onde o objetivo é encontrar as contingências mais graves. Para tal fim o algoritmo metaheurístico de *Simulated Annealing* é aplicado para o problema de seleção de contingências em sistemas elétricos de potência, no qual serão tratados os limites para fluxo de potência ativa nos ramos (SAVFP, *Simulated Annealing* para o problema de Violação de Fluxo de Potência). Como resultado, tem-se a expectativa de comprovar que a aplicação da metaheurística *Simulated Annealing* para o problema de seleção de contingências retorne soluções dentro dos prazos e restrições operacionais necessárias, assim podendo ser utilizadas como parte da operação de análise de segurança em centros de controle. É esperado que o algoritmo seja eficaz e eficiente na determinação dos casos mais graves para os sistemas elétricos analisados e que possa chegar a resultados ótimos ou subótimos em um curto espaço de tempo.

A principal função da etapa de seleção de contingências é reduzir a lista de contingências que devem ser avaliadas pela etapa de Análise de Contingências (GUERRA, 2002), eliminando contingências que não geram impacto ao funcionamento da rede, isso acontece devido à regra geral em sistemas elétricos de potência, em que uma grande parte das contingências não geram grandes impactos ao funcionamento do SEP (GERHARDT, 2007).

Na literatura são encontrados trabalhos que aplicam algoritmos metaheurísticos para resolver o problema de Seleção de Contingências dentro da análise de segurança em sistemas elétricos. Um dos trabalhos mais recentes é o trabalho do autor Farias Costa (FARIAS COSTA, 2011) que propôs a aplicação de Algoritmos Genéticos (AG) para a busca de soluções sob o ponto de vista do fluxo de potência ativo (AGFI), e um segundo algoritmo genético que busca uma seleção de contingências mais graves sob o ponto de vista de tensão nas barras (AGTn).

Ao final deste trabalho, objetivando a validação e análise dos resultados obtidos, será feita uma comparação com os resultados obtidos por Farias Costa (FARIAS COSTA, 2011). Para que tal comparação possa ser feita, serão utilizados testes para as mesmas redes elétricas utilizadas no trabalho acima citado.

Dada a importância da tarefa de Seleção de Contingências na Análise de Segurança Estática em redes elétricas, além das severas restrições de tempo impostas à operação nos centros de controle, o objetivo deste trabalho é desenvolver um algoritmo de *Simulated Annealing* (SA) para aplicação em redes reais de grande porte. As contribuições deste trabalho para melhorar as propostas existentes serão:

- avaliar a adequação do uso de SA para a seleção de contingências em uma rede real de grande porte;
- permitir a avaliação de contingências múltiplas (falta de mais de um equipamento na rede) através de um método eficaz e robusto.



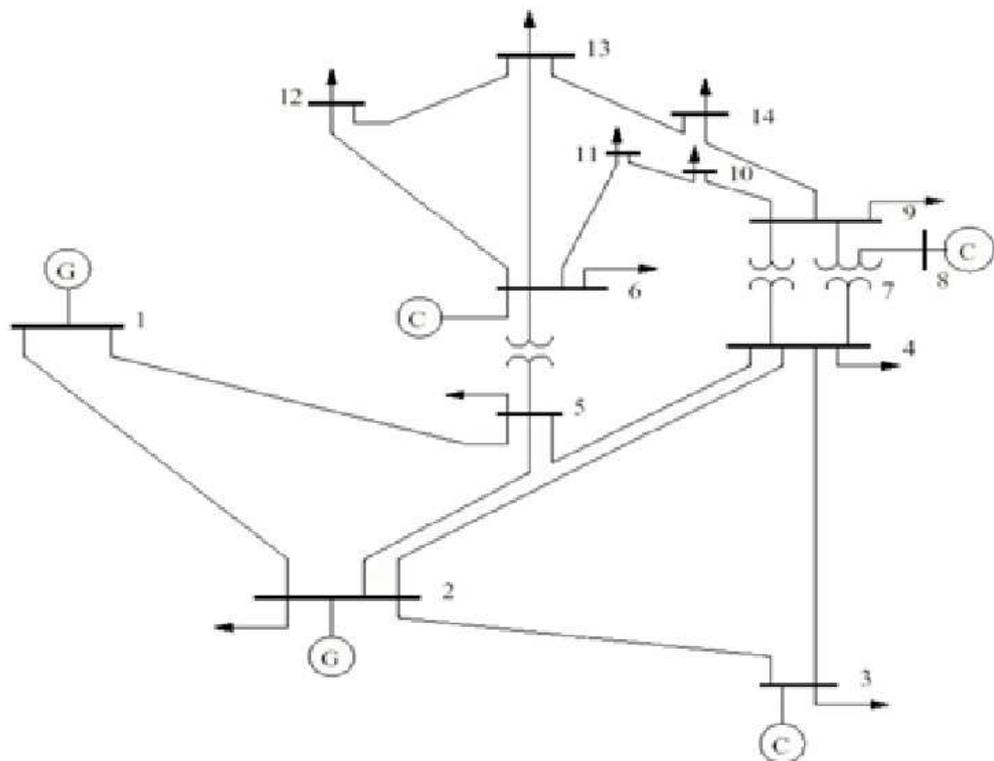
## 2 ANÁLISE DE SEGURANÇA EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

Neste capítulo são abordadas características dos sistemas elétricos de potência assim como detalhes sobre seu funcionamento, que vão ajudar a entender melhor o problema abordado.

### 2.1 Conceitos Básicos em Sistemas Elétricos de Potência

Sistemas elétricos de potência são definidos como uma coleção de elementos elétricos interconectados de maneira específica (JOHNSON, 1990). Para fins de teste e simplificação, existe uma redução de uma rede real, que é muito utilizada em trabalhos para exibição de exemplos, conceitos e validação, esta rede é denominada de IEEE-14, descrita por (FRERIS, 1968). Um exemplo demonstrando as barras e ramos que interligam essa rede, pode ser visto na Figura 1, assim como a identificação dos nós 1 e 2 como geradores identificados pela letra G.

Figura 1: Exemplo da rede utilizada para testes, IEEE – 14.



Fonte: (KUMAR, 2011).

Diferentemente do Sistema Elétrico de Potência exibido na Figura 1, que demonstra uma simplificação, os sistemas de potência reais são compostos por centenas e até milhares de componentes, criando sistemas grandes e complexos. Durante a operação, é mantida a sincronia das cargas existentes na rede com a geração de energia, mantendo um equilíbrio dinâmico. Esse equilíbrio deve ser mantido para o controle de flutuação das cargas que são causadas por

alterações de consumo ou por mudanças de chaveamentos do sistema ou até mesmo alguma falha (TOMSOVIC, 2005).

A definição de contingência em SEP é dada pela saída de operação de algum equipamento que compõe o sistema, como exemplo alguma linha de transmissão pelo seu rompimento ou gerador pela sua parada de funcionamento (SUDERSAN, ABDELRAHMAN, & RADMAN, 2004). Essas contingências podem ocorrer por diversas causas, como problemas atmosféricos, incêndios, erros de chaveamento, falhas em equipamentos, entre outras (ALMEIDA, 2005).

Alguns conceitos sobre SEP são explicados abaixo:

- segurança em SEP é uma condição de momento, depende de um estado em determinado instante, ela deve refletir sobre o risco de uma possível redução de desempenho do sistema, ou até a saída de operação. Essa segurança implica em técnicas de análises, chaveamentos e operações para manter o sistema funcional caso alguma contingência ocorrer (GERHARDT, 2007);
- segurança é, também, a habilidade de um sistema permanecer funcionando sem consequências graves, mesmo após ocorrer qualquer tipo de distúrbio já conhecido (SRIVANI, 2008);
- estabilidade consiste na habilidade de um SEP, na ocorrência de distúrbios que causam contingências, de manter um estado de equilíbrio operacional, ou seja, após uma contingência o sistema deve se manter funcionando sem ter limites operacionais violados (FARIAS COSTA, 2011);
- medição de segurança é a análise realizada na extensão de uma rede para definir se o SEP em questão está com um nível operacional seguro quanto às interferências sérias em sua operação. (BALU, 1992).

### 2.1.1 Fluxo de Potência em SEP

O fluxo de potência em SEP possui diversas formas de ser abordado e pode ser aplicado em diversos tipos de problemas.

O Método de Newton (TINNEY & HART, 1967) consiste na aplicação formal de um algoritmo genérico para resolver equações não lineares e de sucessivas soluções da equação (1):

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V/V \end{bmatrix}, \quad (1)$$

onde:

$\Delta P$  é o incremento na injeção de potência ativa;

$\Delta Q$  é o incremento na injeção de potência reativa;

$\Delta \theta$  é o incremento no ângulo de tensão na barra;

$\Delta V$  é o incremento na magnitude de tensão na barra;

V tensão nominal da barra;

H, N, J, L Sub Matrizes da matriz jacobiana.

Um dos métodos mais utilizados para cálculo do fluxo de potência em SEP é o método do Fluxo de Potência Desacoplamento Rápido (FCDR). Este método é derivado do método de Newton-Raphson, e consiste de apenas dependências entre a tensão e a potência ativa ( $V$  e  $Q$ ), e entre potência ativa e ângulo de tensão na barra ( $P$  e  $\theta$ ), sendo considerados no cálculo. Este método é consideravelmente simples, tem uma boa confiabilidade e eficiência para o cálculo do fluxo de potência. Essas características o tornam uma boa opção quando é necessário fazer o cálculo de contingências *on-line* em SEP de qualquer tamanho (STOTT & ALSAC, 1973), sendo que a solução de FCDR é bem aceita como base para cálculos de Índices de Performance (ALBUQUERQUE, 2005).

O método 1P-1Q (como também é conhecida a primeira iteração do FCDR) é o mais utilizado para a obtenção de um cálculo aproximado do Fluxo de Potência (MENG, XUE, & LO, 2006). Outros métodos têm sido estudados para a execução de um cálculo aproximado do fluxo de potência, como o FINFLO que demonstrou gerar melhores resultados que o método 1P-1Q nos testes realizados para redes IEEE14, IEEE57 e IEEE300 (MENG, XUE, & LO, 2006), porém foi identificado alguma perda de eficiência na execução do cálculo.

O método FINFLO já conhecido e validado (MENG, XUE, & LO, 2006), foi novamente implementado para novos testes, já que era visto como um avanço para o problema dos fluxos de potência, e então novos estudos foram realizados utilizando contingências duplas onde também obteve resultados mais precisos que o 1P-1Q, com custos um pouco mais elevados na eficiência, onde os testes e validações foram executados nas redes IEEE14, IEEE57, IEEE300 (MENG, XUE, & LO, 2009). Embora os bons resultados obtidos por este novo método, o método 1P-1Q ainda é o mais utilizado e largamente estudado em diversos trabalhos, inclusive com melhorias em sua eficiência sem perda de sua eficácia (MENG, XUE, & LO, 2009).

Para este trabalho o cálculo de fluxo de potência é realizado por componente externo que utiliza uma técnica desenvolvida em (CANTO dos SANTOS & GARCIA, 1998), que utiliza uma variação do FCDR para os cálculos de fluxos de potência nas linhas.

## 2.2 Análise de Segurança

A execução de tarefas de supervisão e controle na operação de SEP em tempo real está sujeita a uma severa restrição de tempo, ou seja, as funções devem ser executadas o mais rapidamente possível (CHIEN, CHENG, CHOU, & LIU, 2007). Como exemplo, a análise de segurança deve ser executada ciclicamente entre 15 e 30 minutos. Já o monitoramento de estado de operação da rede é a cada 15 segundos. Dessa forma, torna-se necessário desenvolver métodos que permitam um procedimento rápido na obtenção desses dados, porém sem perder a precisão. Em relação ao desenvolvimento dessas metodologias, existem quatro funções que requerem novas metodologias para utilização em tempo real (GERHARDT, 2007). São elas:

- a) obtenção de estratégias de controle corretivo/preventivo;
- b) obtenção de estratégias de análise eficiente para detecção de situações que a rede possa operar nos estados Preventivo e Alerta;
- c) avaliação de segurança em redes com relação à estabilidade de tensão;
- d) avaliação dinâmica de redes.

A análise de segurança divide-se em duas seções, a Análise Dinâmica (AD) e Análise Estática (AE) (FARIAS COSTA, 2011). Uma breve apresentação sobre o assunto é abordada nesta seção.

### 2.2.1 Análise Dinâmica em SEP

A Análise Dinâmica (AD) consiste em reproduzir o comportamento dinâmico para estudo, no domínio do tempo ou frequência, de fenômenos que ocorram na rede. A simulação desses fenômenos é particularmente importante para a realização de estudos envolvendo as coordenações de controle e proteção, ou mesmo para a compreensão de fenômenos como instabilidades ou colapso de tensão (FRANCISCO, 2005).

Em SEP, existe uma grande quantidade de fenômenos que causam alterações no comportamento dinâmico da rede, estes fatos podem acontecer de diversas formas, alguns fenômenos podem acontecer muito rapidamente em frações de milissegundos, e outros podem ocorrer durante horas. Muitos equipamentos foram desenvolvidos e instalados nos sistemas no objetivo de diminuir os impactos destes fenômenos em equipamentos locais, porém alguns distúrbios causados podem causar impactos tão distante do local de origem que não é possível visualizá-los ou ter controle sobre ele (TOMSOVIC, 2005).

A Análise dinâmica tem grande importância na busca por prever estes fenômenos e controlá-los, porém, para isso é necessário que grandes volumes de informação seja coletado e processados, exigindo grandes esforços computacionais de processamento aumentando o tempo para obter resultados. Na tentativa resolver estes problemas, técnicas de programação paralela, programação dinâmica tem sido exploradas por alguns autores, e vêm reduzindo o tempo de simulação necessário, assim tornando viável a utilização de AD em aplicações reais de forma on-line (FRANCISCO, 2005).

### 2.2.2 Análise Estática em SEP

A Análise Estática (AE) considera que o sistema se encontra operacional e em equilíbrio, ou seja, todas as cargas do sistema são atendidas sem restrições de operação e que nenhuma possível restrição retire o sistema do estado seguro (CARPENTIER, 1993). Transições de potência ativa e magnitudes de tensão devem ser avaliadas por outros métodos, sendo que nas condições acima descritas ser responsável por permitir que análises eficientes sejam executadas a partir de um ponto de operação, permitindo que sejam executadas completas e detalhadas análises de distúrbios dinâmicos causados por contingências.

Por meio de simulações a análise estática permite a detecção de violações do fluxo nas linhas de transmissão ou tensão fora do limite em barras, através de simulações executadas em uma lista de possíveis contingências. Dá-se grande importância aos itens contidos nesta lista, pois nela permite a análise dos casos que podem retirar o SEP do estado seguro, e também responsável por permitir que esta simulação seja executada em tempo real. Por estes motivos as soluções candidatas contidas nesta lista devem ser bem selecionadas com possíveis situações que causem fatos realmente danosos a rede, e este processo que seleciona os itens mais importantes a compor esta lista é chamado de Seleção de Contingências (DEVARAJ, 2002).

### 2.2.3 Estados de Operação

Os estados de operação têm um importante papel na AE, pois eles permitem que os operadores conheçam o estado atual da rede, e derivem desse estado ações de controle que sejam necessárias, caso o estado de operação as exija.

Para efeitos de avaliação do SEP, quatro modos ou estados de operação foram criados e definidos para o trabalho de análise de segurança (GERHARDT, 2007). Três destes estados foram definidos inicialmente como Preventivo, Emergência e Restaurativo, seguidos por um quarto modo, definido chamado de estado de Alerta, que é um estado de operação derivado do Preventivo, onde todas as demandas são atendidas sem violações. O que diferencia este estado é a existência de uma contingência possível que levaria o sistema a um estado de emergência. O objetivo de controle do estado de alerta é executar ações que levem o sistema ao estado Preventivo o mais rápido possível (EWART, 1971).

O estado preventivo é considerado estado normal de operação, e este nome é utilizado para considerar a necessidade constante de avaliar a segurança durante a operação deste estado. O estresse no aspecto de segurança é executado para garantir o objetivo de fornecimento sem interrupções do serviço a mínimos custos. Para isso, é necessário reconhecer distúrbios elétricos e ambientais, avaliar os riscos envolvidos e tomar ações preventivas de modo a sustentar o objetivo de controle (DY LIACCO, 1967).

O estado é considerado de Emergência quando o valor de referência de controle de algum aspecto de um componente é excedido. Por exemplo, quando a tensão não pode ser mantida em um nível seguro para o consumo de energia ou quando a frequência cai a um nível que seu uso seja contraindicado ou, ainda, quando algum gerador possa perder a sincronia. O objetivo do controle do estado de emergência é atender a maior quantidade possível de carga deixando aspectos econômicos em segundo plano (DY LIACCO, 1967).

No estado Restaurativo, existem cargas não atendidas, e o objetivo de controle nesse estado é restaurar o atendimento de toda a carga no menor tempo possível, existindo sistemas específicos com regras específicas para que esse processo seja executado (DY LIACCO, 1967).

### 2.2.4 Índice de Performance

O índice de performance (IP) é o valor calculado para avaliar a severidade de uma contingência (CHEN & BOSE, 1989). Desta forma, é possível fazer uma análise da gravidade que uma contingência pode causar em um sistema (ALBUQUERQUE, 2005), (SUDERSAN, ABDELRAHMAN, & RADMAN, 2004). Realizado o cálculo do índice de performance para as contingências é possível avaliar e comparar o impacto de cada contingência, tendo como formulação geral para o cálculo do IP a equação (2).

$$IP = \sum_{i=1}^{nl} \left(\frac{P_i}{L_i}\right)^2, \quad (2)$$

onde:

$IP$  - Índice de performance;

$i$  - Índice;

$nl$  - Número de equipamentos;

$P_i$  - Fluxo de potência ativa no ramo  $i$ ;

$L_i$  - Limite para o Fluxo de potência ativa no ramo  $i$ .

### 2.3 Centros de Controle e Operação

Centros de controle são locais designados pelas empresas onde uma infraestrutura é montada, para que engenheiros possam observar e controlar os sistemas elétricos, visando a manter a estabilidade e segurança do sistema (FARIAS COSTA, 2011). Nesses centros de controle, existem diversas ferramentas de *software* e *hardware* envolvidas no processo de manter a rede elétrica operante. O tamanho de uma rede elétrica define o tamanho do seu centro de controle, tanto em complexidade de controle como em número de controles necessários (TOMSOVIC, 2005), (CHEN S. , 2004).

Em alguns trabalhos, nota-se uma grande evolução nos *softwares* utilizados nos centros de controle, *softwares* onde são destaques a interoperabilidade entre os sistemas e a flexibilidade entre o *software* e *hardware* (CHEN S. , 2004). Entre esses controles, está a análise do sistema voltada à análise de segurança. As seguintes funções compõem os sistemas de controle (FARIAS COSTA, 2011):

- **configurador:** responsável pela construção do modelo de rede, avalia eventuais alterações na topologia da rede em suas avaliações;
- **estimador:** responsável por obter o estado da rede da parte onde ela é observável, ou seja, que existam dados disponíveis nos centros de controle, assim eliminando erros mais grosseiros das medições do sistema;
- **modelagem da rede externa:** constrói um modelo capaz de reproduzir o comportamento do sistema externo através do estado obtido e de informações sobre a parte não observável da rede;
- **fluxo de potência *online*:** determina as grandezas elétricas nas barras de geração, barras de carga e linhas, após esses cálculos, com um modelo de estado atual da rede, é possível fazer estudos e análises;
- **análise de segurança:** simulações de contingência são realizadas em suas variações para garantir um estado seguro da rede. Existem restrições de tempo para essa tarefa, por isso a importância da aplicação de diversas técnicas que consigam trazer resultados eficientes para este objetivo;
- **fluxo de potência ótimo:** essa ferramenta permite otimizar o despacho e transmissão de energia elétrica levando em consideração restrições de operação e segurança. O conceito de otimização de operação mais visto em décadas passadas tem sido

apontado como o principal objetivo dos estudos, sendo avaliado o objetivo financeiro e também os ambientais.

## 2.4 Seleção de Contingências e Análise de Contingências

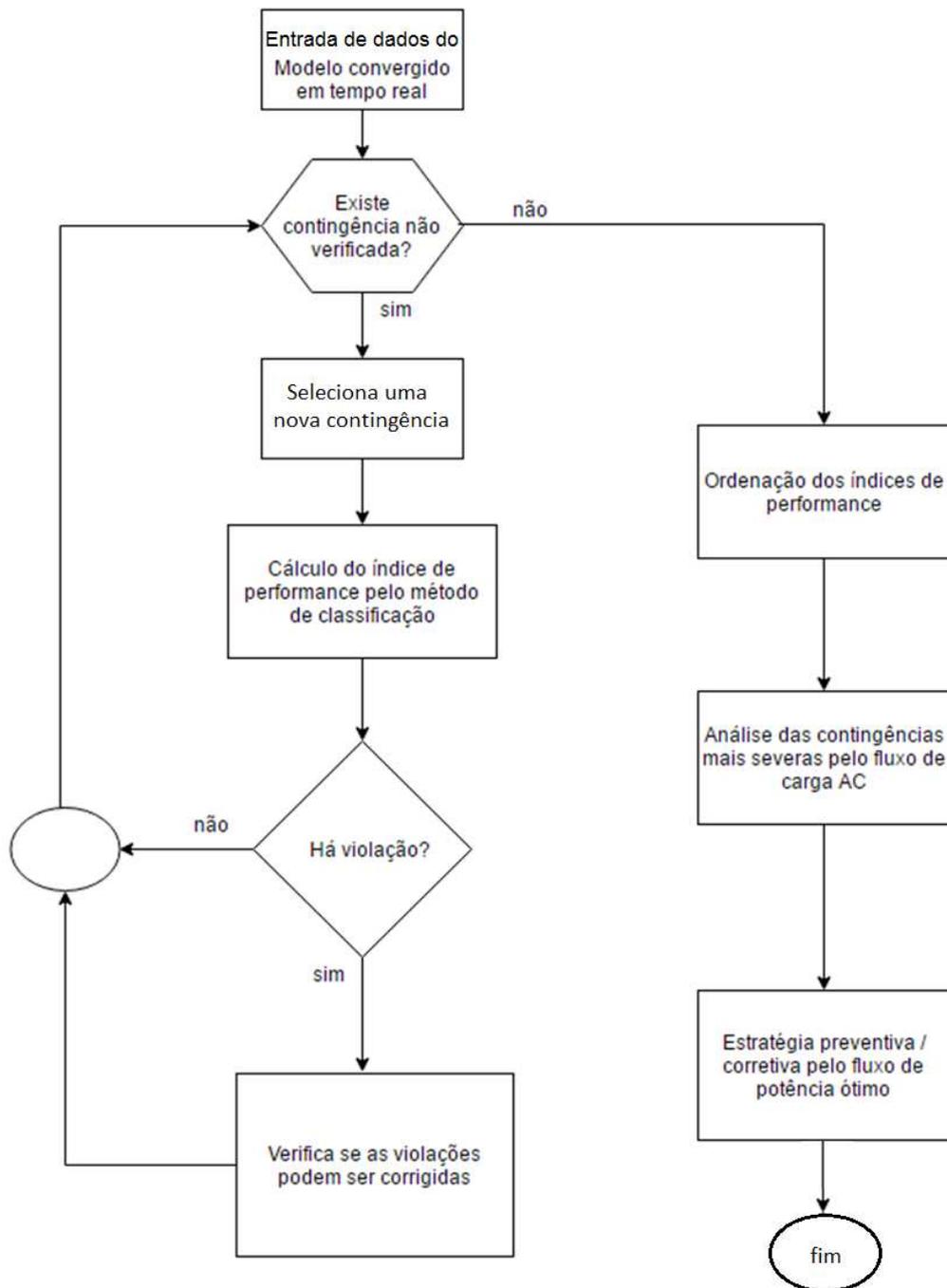
Uma vez que o processo de análise de contingência avalie efeitos individuais na rede quando possíveis contingências ocorrem, este processo traz um trabalho árduo e que consome muito tempo, em casos onde as redes de potências são maiores como a rede 810 do sistema sul brasileiro por exemplo. A fim de aliviar o problema, o processo de seleção de contingências como a triagem (*screening*) é utilizado, e ele praticamente encontra e remove todas as possíveis contingências que não causam interrupções ou quedas de voltagem nas barras.

O processo de identificar as contingências que atualmente lideram os limites operacionais é conhecido como seleção de contingência. As contingências são selecionadas pelo cálculo da severidade, esse conhecido como Índice de Performance (IP) (KUMAR, 2011). Esses índices são calculados usando algum algoritmo de cálculo de fluxo de potência para cada contingência individualmente e que possibilita chegar ao cálculo do índice de performance para cada possível contingência. Baseado nos valores obtidos, as contingências são classificadas de maneira onde as mais altas devem vir no topo da lista, e por essa ordem deve-se iniciar a análise de contingência.

O processo de seleção de contingências sofre com um problema metodológico, que é diretamente impactado pelo tamanho da rede avaliada. Este problema consiste da definição do tamanho da lista de contingências mais críticas, sendo a lista com tamanho muito grande e contendo muitos itens. O processo de análise de segurança para cada item é um processo demorado, e que em seu contrário, ou seja, uma lista muito pequena, contingências danosas ao sistema podem deixar de ser detectadas (ALMEIDA, 2005).

Um fluxograma com a técnica de Análise de Segurança pelo método de classificação é mostrado na Figura 2.

Figura 2: Fluxograma do processo de Análise de Segurança.



Fonte: (GERHARDT, 2007) adaptado pelo autor.

O processo para obter o valor de IP, para cada contingência, é iniciado pela numeração das mesmas para conveniência. Após, para cada linha, é simulada a saída de operação, o fluxo de potência é calculado através do FCDR e a equação para cálculo de IP é aplicada sobre a rede.

## 2.5 Revisão de literatura

Nesta seção são tratados importantes trabalhos na área, trabalhos esses que focam tanto a natureza estática quanto a natureza dinâmica do problema de análise de segurança de redes de energia elétrica.

Os autores Abdelaziz e Mekhamer (ABDELAZIZ & MEKHAMER, 2013) apresentam um algoritmo para buscar a melhor localização para instalação de tiristores para controle de banco de capacitores e reforço na segurança estática e minimização de perda global do sistema elétrico. Para seleção de ramos que receberão os tiristores e o banco de capacitores, é necessária uma avaliação prévia do sistema sobre todas as possibilidades de contingências. A localização é determinada pela avaliação do índice de sensibilidade da contingência para um ramo de um sistema e para um dado número de contingências. A otimização em busca dos locais onde os tiristores são melhor aproveitados é determinada pela técnica de *Simulated Annealing*, onde as configurações são escolhidas para minimizar as perdas globais dos sistemas de potência. Em seus resultados são exibidas tabelas que mostram um *Ranking* onde são classificados os ramos mais críticos e com maior importância na instalação dos tiristores com banco de capacitores. Como conclusão, mostra para a rede IEEE30 uma melhora de 19% no estado normal do sistema, uma redução de 24% nos estados de alerta do sistema e uma redução do estado de emergência em torno de 15%.

O autor Amit Kumar (KUMAR, 2011), em sua dissertação de mestrado, descreve um trabalho que faz comparações sobre análise de segurança utilizando o FCDR, implementado utilizando o ambiente MATLAB, com uma implementação utilizando redes neurais artificiais. Foram feitas comparações, sendo que o primeiro algoritmo desenvolvido em MATLAB foi implementado utilizando técnicas tradicionais, onde um índice de performance para cada elemento individual da rede é calculado e no final é feita uma classificação para ficar em ordem os elementos com maior índice de performance. Salienta-se que esse processo se mostra complexo e pode ser inviável para sistemas de grande porte, por esse motivo o autor apenas executa para duas instâncias, IEEE14 e IEEE30. O sistema baseado em redes neurais artificiais foi escolhido pelo motivo que o método tradicional não resolve o problema de operação em sistemas de grande porte. A configuração da rede sofre frequentes alterações durante a operação, desta forma, uma vez que redes neurais artificiais têm a capacidade de prever a saída para uma dada entrada imprevisível. Após esta rede ser treinada com um número suficiente de padrões de treinamento o algoritmo é capaz de prever as saídas correspondentes.

Além disso, redes neurais têm sido utilizada para problemas de natureza dinâmica em sistemas de energia, como análise de contingências, previsão de cargas e detecção de falhas de componentes, etc. Como conclusão do algoritmo de redes neurais artificiais, o autor descreve que quando se usam parâmetros corretos para a rede neural artificial, os resultados obtidos pelo algoritmo ficam muito próximos dos resultados obtidos pelo método do FCDR, porém a rede neural tem a capacidade de realizar a seleção de contingências para qualquer condição de carga ou geração, uma vez que o algoritmo seja corretamente treinado. Assim, o algoritmo proporciona uma solução muito mais rápida e precisa para a análise de contingências. A previsão dos índices de performance é instantânea quando calculado através do algoritmo proposto, utilizando redes neurais artificiais e, então, pode-se colocar em uso embutidas nas aplicações de controle em sistemas elétricos de potência.

Farias Costa (FARIAS COSTA, 2011) descreve em seu trabalho a eficiência do algoritmo genético aplicado à Análise de Segurança em Sistemas Elétricos de Potência, utilizando o cálculo de verificação denominado Taxa de captura. Essa eficiência foi percebida

pela obtenção de taxa de captura elevada e varreduras de pequenas porções do espaço de busca dos estados envolvido. Esses resultados mostram uma redução de processamento muito grande, deixando claro que o método é viável para utilização dentro dos centros de controle. Esse benefício é obtido devido ao fato que o mecanismo de busca aplicado dentro do Algoritmo Genético foi customizado para esse fim. O mecanismo de busca adaptado ao problema, com a característica de buscas não lineares do Algoritmo Genético contribuí para os bons resultados obtidos no estudo.

Outro trabalho é o de Gerhardt (GERHARDT, 2007), que propõe um sistema computacional de Análise de Segurança Estática para os Sistemas de Energia Elétrica, que explora as semelhanças entre a análise de segurança e o planejamento em sistemas de energia elétrica. Em seu trabalho, foram aplicadas técnicas de mínimo esforço para resolução do problema, onde o autor descreve que seu algoritmo é capaz de chegar a resultados mais satisfatórios do que com a utilização de métodos tradicionais empregados então. Para tratamento do problema, descreve que esse resultado pode ser notado em seus testes e apresentado para redes de pequeno porte, como IEEE30 com 30 barras, ou até mesmo em redes de grande porte com 3.425 barras.

O trabalho de Canto dos Santos e Garcia (CANTO dos SANTOS & GARCIA, 1998), usa como base o trabalho desenvolvidos por Monticelli *et al* de 1982 (MONTICELLI, et al., 1982), onde são aplicadas redes fictícias com grandes impedâncias em funções das reatâncias que sobrepõem as redes originais. Desta forma é possível avaliar as redes originais quando desconexas sem causar grande esforço computacional. O principal objetivo do trabalho é avaliação e tratamento de desconexões da rede, chamados de ilhamentos.

## 3 CONCEITOS BÁSICOS SOBRE METAHEURÍSTICAS

Neste capítulo, será dada uma breve introdução sobre otimização e metaheurísticas, detalhes da arquitetura desses algoritmos são mencionados, também alguns estudos que originaram essas técnicas.

O algoritmo de *Simulated Annealing* é apresentado com seus detalhes de funcionamento, citando algumas de suas vantagens e também um pseudocódigo junto com a abordagem sobre a técnica onde o SA foi inspirado.

### 3.1 Otimização

É importante falar de alguns conceitos sobre otimização e metaheurísticas. Assim sendo, alguns detalhes são mencionados a seguir, e caso seja preciso, as respectivas fontes podem ser consultadas para um aprofundamento.

#### 3.1.1 Otimização Estocástica

Otimização ou programação matemática pode ser considerado um método que determina o melhor conjunto de parâmetros para se chegar a um objetivo definido. Quase todos problemas da vida real podem ser modelados matematicamente, e uma função objetivo deve ser definida, esta função deve simular valor objetivo, ou então ser o mais próximo possível (NEMHAUSER & WOLSEY, 1999). O total de alternativas possíveis de combinar as variáveis do sistema modelado gera um conjunto finito de soluções, que em sua totalidade é chamado de espaço de soluções (PAPADIMITRIOU & STEIGLITZ, 1998).

Otimização pode ser aplicada em um número variado de problemas, onde que alguns podem ser bem simples com um pequeno número de variáveis, por exemplo, o caminho com a menor distância entre duas cidades, ou então problemas complexos com grande número de variáveis, como por exemplo, o caminho mais rápido entre 2 cidades, considerando o trânsito local, tempo de sinaleiras, velocidade das vias, o clima, com a possibilidade de muitas outras que podem influenciar no resultado (AARTS & LENSTRA, 2003).

Em problemas de otimização combinatória, é comum a ocorrência da explosão combinatória de resultados, sendo esta a quantidade demasiada de possíveis soluções impedindo que sejam utilizados métodos exatos na busca pela melhor solução devido ao alto tempo de processamento necessário (ARTMANN, 2011). Dessa forma existem alternativas na busca por boas soluções, e uma alternativa são os métodos aproximados, sendo as metaheurísticas uma das mais utilizadas nesta área. Para justificar seu uso é importante avaliar o método gradiente, uma técnica geral de grande importância em estudos de otimização.

Tradicionalmente, o método gradiente é um algoritmo de aproximação de primeira-ordem. O método que o algoritmo utiliza é identificar a inclinação da função em um ponto inicial, seguindo então a função em direção ao objetivo, por meio de incrementos ou decrementos proporcionais ao gradiente da função (LUKE, 2009). Esse algoritmo pode ser simples, porém nele existem alguns problemas, o primeiro deles é que quando o algoritmo se aproxima do final, a inclinação da função oscila em torno do ponto devido à variação de sinal do gradiente, e isto pode consumir um tempo considerável até que o valor procurado seja atingido. Também um grave problema é causado por falsos máximos ou mínimos, causados por

pontos de inflexão de mínimos ou máximos locais, esses falsos pontos podem ser erroneamente tomados como resposta da função (NELDER, 1965).

### 3.2 Algoritmos Metaheurísticos

O estudo sobre metaheurísticas está dentro de um subcampo da otimização estocástica, definidos de forma geral como os algoritmos que empregam técnicas com algum grau de aleatoriedade na busca por soluções tão ótimas quanto possível, em comum aplicadas para problemas de alto grau de complexidade.

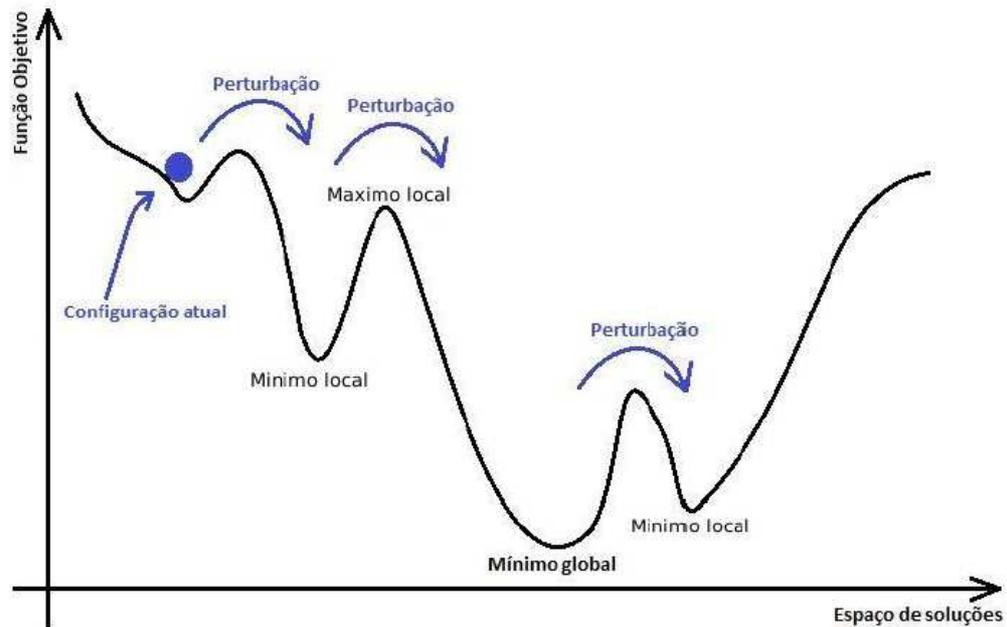
Metaheurísticas são algoritmos baseados em métodos que executam buscas locais com determinados objetivos definidos pela função objetivo. Para que o algoritmo não fique preso a mínimos locais existem técnicas que empregam alguma aleatoriedade nas buscas, chamadas de perturbações, este sendo responsável pela fuga de mínimos locais e maior diversificação da área de busca do algoritmo (GLOVER & KOCHENBERGER, 2003).

A aplicação das metaheurísticas é adequada para problemas sobre os quais há pouca informação sobre o melhor resultado ou como chegar nele. São problemas onde não se sabe como é a “aparência” de uma solução ótima, pouca informação heurística disponível para o problema, onde força bruta é descartada pelo tamanho do espaço de soluções ser muito grande. Porém, uma solução candidata pode ter sua otimalidade testada e averiguada.

### 3.3 *Simulated Annealing*

A origem do método de *Simulated Annealing* (SA) foram os métodos estatísticos. A primeira proposta foi feita por *Kirkpatrick et al.* (KIRKPATRIK, GELATT, & VECCHI, 1983), e sua total independência de métodos estatísticos por (CERNY, 1985). SA é inspirado pela técnica do *Annealing* (têmpera) utilizada na metalurgia para obter um estado sólido com mínima energia. É um método probabilístico de busca em trajetória, para busca de mínimos ou máximos de uma função custo. O algoritmo simula um processo físico no qual um sólido aquecido é lentamente resfriado até sua temperatura mínima, representando o estado de menor energia (KIRKPATRIK, GELATT, & VECCHI, 1983). A trajetória da função objetivo no espaço de solução pode ser representada como na Figura 3, que apresenta os movimentos executados pelo algoritmo onde a função objetivo se desloca a mínimos locais, utilizando de perturbações para fugir destes mínimos e atingir ótimos globais.

Figura 3: Trajetória típica em um algoritmo de busca *Simulated Annealing*.



Fonte: (KIRKPATRIK, GELATT, & VECCHI, 1983), adaptado pelo autor.

O *Simulated Annealing* transporta esse processo de acomodação para a solução de problemas de otimização. A função objetivo do problema simula a energia dos materiais, após o aquecimento da 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) e inicializa o parâmetro da temperatura com  $Tini$ . Então 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 de  $s'$  e  $s$ , definida por  $f(s')$  e  $f(s)$  respectivamente. Para um problema de minimização 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 de

$$p(T, f(s'), f(s)) = \exp\left(-\frac{f(s') - f(s)}{T}\right), \quad (3)$$

onde:

$T$  = temperatura do sistema;

$s$  = solução atual;

$s'$  = nova solução para avaliação;

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

$f(s)'$  = valor da função objetivo da nova solução  $s'$ .

A temperatura  $T$  é decrescida durante cada final do processo de busca pela vizinhança local, a fórmula para atualização de temperatura pode ser expressa por  $(T \cdot \alpha)$  (onde  $\alpha$  é uma constante com valor entre 0 e 1). Depois de atualizada a temperatura, o contador de iterações é reiniciado e uma nova busca é inicializada, a probabilidade de aceitação vai sendo diminuída com os movimentos, conseqüentemente pela redução de  $T$  e assim o algoritmo vai se direcionando para busca de um mínimo local (CONNELLY, 1992), podendo sofrer processos de reaquecimento visando atingir novos locais de busca. Um algoritmo de SA em alto nível é exibido na figura 4.

Figura 4: Exemplo de um pseudo algoritmo de *Simulated Annealing*.

```

1  Inicio
2  /* Entradas do Algoritmo */
3  Ler (S0, M, P, L,  $\alpha$ )
4  /* Inicialização das variáveis */
5  S = S0
6  T0 = TempInicial()
7  T = T0
8  j = 1
9  /*Loop principal - Verifica se foram atendidas as condições de termino do algoritmo*/
10 Repita
11     i = 1
12     nSucesso = 0
13     /*Loop Interno - Realização de perturbação em uma iteração*/
14     Repita
15         Si = Perturba(S)
16          $\Delta f_i = f(S_i) - f(S)$ 
17         /*Teste de aceitação de uma nova solução*/
18         Se ( $\Delta f_i \leq 0$ ) ou ( $\exp(-\Delta f_i/T) > \text{Randomiza}()$ ) então
19             S = Si
20             nSucesso = nSucesso + 1
21         Fim-se
22         i = i + 1
23     Até (nSucesso  $\geq$  L) ou (i > P)
24     /*Atualização da Temperatura*/
25     T =  $\alpha \cdot T$ 
26     /*Atualização do Contador de iterações*/
27     j = j + 1
28 Até (nSucesso = 0) ou (j > M)
29 /*Saída do Algoritmo*/
30 Imprima (S)

```

Fonte: (BOUSSAID, 2013) - Adaptado pelo autor.

É aceito que o algoritmo pode convergir para uma solução  $s$ , mesmo que uma solução melhor  $s_0$  seja encontrada durante o processo. Logo, uma melhora básica do SA consiste em salvar a melhor solução encontrada durante o processo de busca para uso como solução global final de  $f(s)$ .

Uma grande vantagem do SA é o fato de que a cada iteração somente uma solução é visitada, assim a avaliação da função objetivo não prejudica a eficiência do algoritmo. Em contrapartida, a desvantagem é a limitada informação do problema, que utiliza apenas o valor da função objetivo para mover ao próximo estado.

O algoritmo SA pode sofrer processos de *reannealing* durante sua execução, consistindo no reaquecimento da temperatura inicial do algoritmo durante seu uso. Alguns autores (COLLINS, 1988), (MOUSTAFA, 2014) descrevem que esse processo tem bons resultados na convergência do algoritmo a ótimos globais, ele permite uma nova perturbação a partir do melhor resultado já encontrado, isso permite ao algoritmo a exploração de novas áreas de busca que dificilmente seriam atingidas sem que esse processo fosse executado.

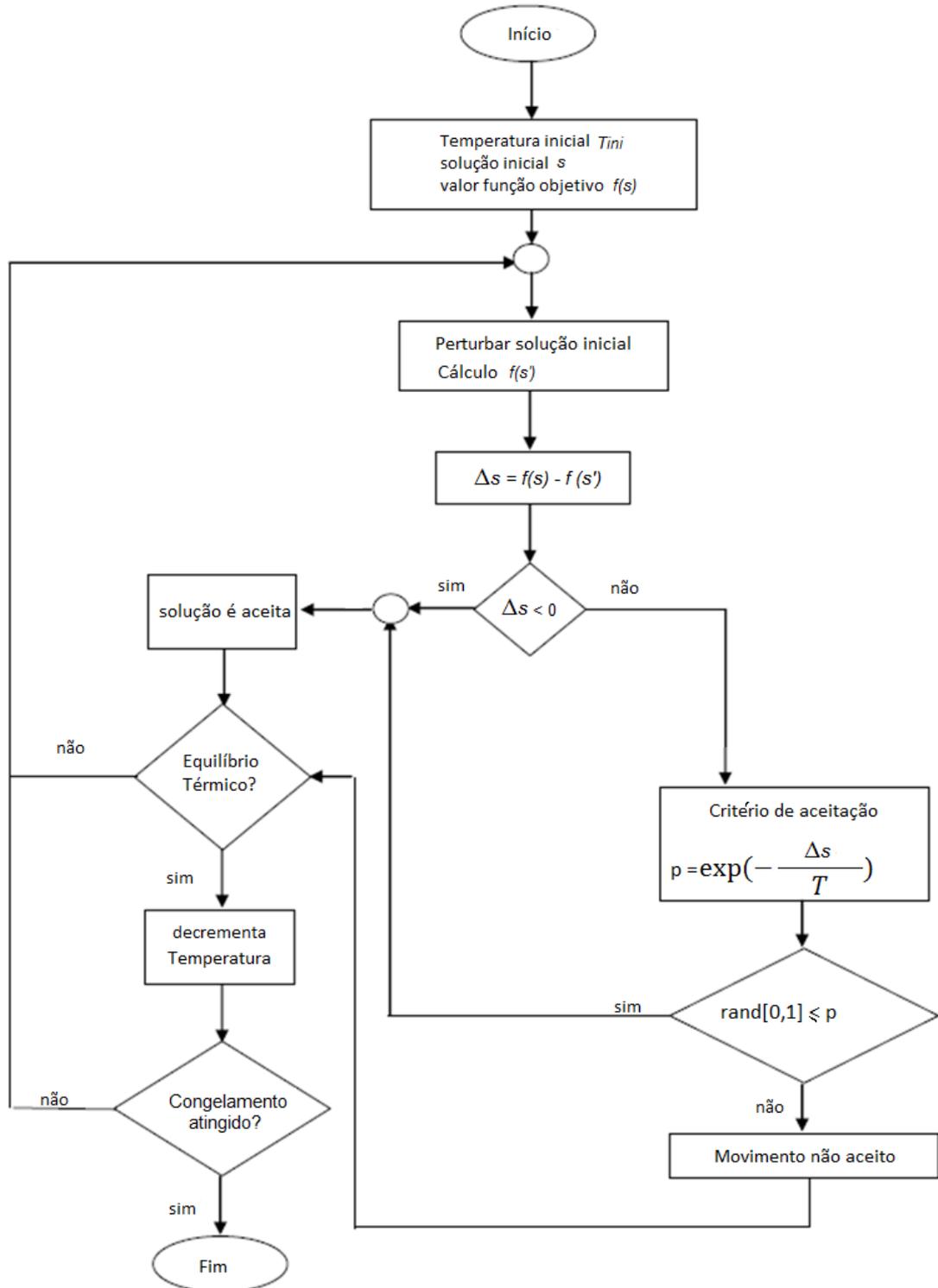
O *Simulated Annealing* foi aplicado com sucesso em muitos problemas de otimização discretos e contínuos, apesar disso, verificou-se que ele se mostrou incapaz de resolver alguns problemas de natureza combinatória (AARTS & LENSTRA, 2003) (BOUSSAID, 2013). A adaptação de SA para problemas de otimização contínua foi particularmente estudada, e uma vasta bibliografia pode ser encontrada nos trabalhos (FLEISCHER, 1995), (COLLINS, 1988), (BOUSSAID, 2013).

O desenvolvimento de qualquer algoritmo baseado em *Simulated Annealing* consiste em quatro importantes elementos (RUTENBAR, 1992):

- a) **um conjunto de configurações do sistema deve ser permitido** (espaço de configurações): esses representam as possíveis soluções do problema sobre as quais a pesquisa percorrerá na busca de um resultado;
- b) **um conjunto de movimentos possíveis (mecanismo de perturbação)**: um conjunto de movimentos permitidos que comportem chegar a todas as configurações possíveis e que sejam fáceis de calcular. Esses movimentos são os cálculos que devem ser executados para se deslocar de uma dada configuração para uma nova configuração, como no processo de *Annealing*;
- c) **uma função de custo**: serve para medir o valor de uma nova configuração atingida, que permite o algoritmo avaliar a qualidade de uma nova solução atingida, encarregada de guiar o algoritmo;
- d) **um plano de resfriamento**: para alinhar o problema a partir de uma solução aleatória para uma boa solução, utiliza-se a direção do congelamento. Especificamente, precisa-se de uma temperatura de partida que seja quente (ou uma heurística para determinar uma temperatura de partida para o problema em estudo) e regras para determinar quando a temperatura atual deve ser reduzida, e quando o resfriamento/acomodação deve ser encerrado, conhecido como equilíbrio térmico.

Na figura 5, pode-se ver um gráfico de fluxo que ilustra os processos do algoritmo de SA.

Figura 5: Fluxo de um algoritmo de *Simulated Annealing*.



Fonte: (ABDELAZIZ & MEKHAMER, 2013) - adaptado pelo autor.

Para qualquer algoritmo implementado com base no SA, algumas definições e parâmetros precisam ser feitos antes de sua execução (ABDELAZIZ & MEKHAMER, 2013). Esses parâmetros basicamente são:

- valor inicial para a variável  $T$  (Temperatura inicial);
- tamanho da vizinhança;

- número de iterações para que a temperatura seja alterada ou fórmula de resfriamento aplicada;
- constante de resfriamento da temperatura;
- critério de parada para o algoritmo.

Para definição de temperatura inicial, alguns autores citam que é desejável que seja feita pela análise da equação de critério de aceitação em movimentos de piora, onde qualquer resultado factível que possa ser aceito (ABDELAZIZ & MEKHAMER, 2013). Assim, é possível que a busca possa se locomover para qualquer lugar no espaço de busca. Dessa forma, a temperatura inicial geralmente recebe valores bem altos, valores que podem ser ajustados por meio de testes, e sendo otimizados, com isso podem ajudar a reduzir o tempo de processamento.

Para o tamanho da vizinhança não existe uma regra definida, ele pode variar conforme a característica do problema e o tamanho da instância avaliada, um valor alto para esse parâmetro é desejável, mas impacta diretamente no tempo de processamento do algoritmo. Para esse parâmetro, uma sintonia fina deve ser feita para melhorar o desempenho final do algoritmo sem grandes impactos no valor do resultado final. Também existem abordagens na literatura que definem esse parâmetro com valores variáveis a cada iteração, sendo possível se ter melhoras no desempenho, obtendo bons resultados para a solução final, porém isso foi verificado apenas para alguns tipos específicos de problema.

Para  $T$ , e valor da constante de resfriamento, em vias gerais, a temperatura pode sofrer alterações a cada iteração do algoritmo ou também se pode definir que a temperatura somente será alterada após um número predefinido de iterações, que inclusive pode ser variável conforme a evolução do algoritmo. Para esse parâmetro, não foi encontrado na literatura uma regra que defina o melhor valor para ele, sendo que na maior parte das implementações estudadas é definido aleatoriamente, logo é realizada uma sintonia por meio de testes.

Utilizando a analogia do resfriamento dos metais, o critério de parada é definido quando a temperatura chega próximo de zero, considerado temperatura de congelamento. Desse modo, para esse valor algumas abordagens citam como  $T^{-20}$  (RUTENBAR, 1992), ou simplesmente quanto  $T=0$ .

### 3.3.1 Estruturas de Vizinhança

Um algoritmo de otimização combinatória baseado em *Simulated Annealing* trabalha com buscas em trajetória utilizando método de busca conhecido por estruturas de vizinhança. A vizinhança é um conjunto de soluções geradas a partir de uma solução inicial candidata.

A geração de uma boa vizinhança é um dos principais fatos que levam o algoritmo a obter bons resultados, desta forma cada tipo de problema deve ter a função de criação de vizinhos avaliada e adaptada ao objetivo em questão (AARTS & LENSTRA, 2003). Vizinhos com uma diversidade em soluções locais e de alta qualidade acaba por ser um dos principais desafios nessa etapa do algoritmo. Para expressar uma função de vizinhança, é necessário primeiramente conhecer a função objetivo do problema (ou da busca). Por exemplo, dado um ponto factível  $p \in P$  do problema, define-se um conjunto de pontos em torno de  $p$ . A vizinhança será mapeada como mostra a equação (4):

$$N : P \rightarrow 2^P, \tag{4}$$

é definida para cada instância do problema (PAPADIMITRIOU & STEIGLITZ, 1998), que leva as soluções de  $P$  em um subconjunto deste mesmo conjunto de soluções da equação (5):

$$N(p) = \{p_1, p_2, \dots, p_k\}. \quad (5)$$

Dessa forma, com o conhecimento de representação de redes de distribuição de energia elétrica e o funcionamento de redes de infraestrutura avançada de distribuição, suas representações na forma de modelagem matemática e apresentação do problema na forma do clássico problema de otimização, é possível a aplicação da metaheurística para seleção de contingências mais graves sob o ponto de vista de violação dos fluxos de potência (FARIAS COSTA, 2011).

## 4 METODOLOGIA

O problema de análise de contingências em SEP pode ser visto como um problema de otimização combinatória pela ocorrência de contingências múltiplas (FARIAS COSTA, 2011), desta forma o número de casos a analisar depende da ordem das contingências consideradas e pode ser determinado pela equação a seguir:

$$C_{n,p} = \frac{n!}{p!(n-p)!}, \quad (6)$$

onde:

$n$  é o número de elementos considerados, no caso presente o número de equipamentos de um sistema elétrico;

$p$  é o número de elementos combinados, no caso presente o número (ordem) de equipamentos sob contingência.

Existem técnicas que resolvem esse tipo de problema, em geral são utilizadas para cálculo em modo *off-line* devido ao elevado tempo que se leva para chegar aos resultados em redes de grande porte. Devido às restrições de tempo que os centros de controle impõem, essas técnicas não podem ser utilizadas para operação de modo *on-line*, pois as redes podem sofrer grandes alterações de configuração em curtos espaços de tempo.

O cálculo do índice de performance para cada possível contingência é fundamental para que se possa classificar as mais graves. Para cálculo do índice de performance é necessário que seja calculado o fluxo de potência a cada contingência, sendo que esse cálculo do fluxo de potência é a tarefa que demanda maior poder computacional. Outro ponto é a viabilidade da aplicação de SA, onde a cada geração de vizinhança somente uma função de custo é calculada.

### 4.1 Aspectos Básicos do Projeto de Programação

Para implementação desse projeto foi utilizada a linguagem de programação C# por ser uma linguagem atual, robusta e largamente utilizada.

Na análise de segurança em SEP, os estudos mostram que uma maneira de resolver o problema é utilizando a remoção de cada item da lista de contingências da rede de modo a avaliar o impacto que ela sofre pela perda do equipamento (MONTICELLI, 1983). Observa-se que esse impacto é calculado como índice de performance, sendo possível determinar o valor de cada componente de uma rede, consolidando em uma lista. Logo, essa lista é ordenada de maneira decrescente, assim se tem a classificação pelo IP, mostrando desde o seu início quais são os itens com maior importância ou que causam maior dano, caso seu funcionamento seja interrompido.

Em redes de grande porte, o cálculo do índice de performance para cada item da rede se torna um trabalho que não é possível de ser executado em tempo hábil, mesmo com os sistemas atuais de processamento, visto que a restrição pode ter a complexidade de falha em apenas um

equipamento identificado como  $K = 1$ , ou até, podendo chegar a  $K=N$  equipamentos combinados, sendo  $N$  o número total de equipamento da rede, gerando o número de casos determinado pela equação (6). Nesse sentido, não é possível chegar a resultados em tempo hábil devido às restrições dos centros de controle já esclarecidas em seções anteriores. Para fins de estudo e pesquisa, neste trabalho somente serão utilizadas restrições de ordem  $K=1$  e  $K=2$ , assim simplificando a análise e apresentação dos resultados.

## 4.2 Índices de Performance para Função Objetivo do Problema

O índice de performance pode ser calculado com a utilização de *softwares* de cálculo do fluxo de potência. Existem no mercado hoje alguns *softwares* comerciais que fazem este cálculo utilizando as mais diversas técnicas, alguns deles como ANAREDE da empresa CEPTEL, também se tem a aplicação FP (Fluxo de Potência) desenvolvido por Canto dos Santos (CANTO dos SANTOS & GARCIA, 1998) que utiliza a técnica de Fluxo de potência desacoplado rápido (FCDR) sendo ele uma particularização do método de Newton-Raphson.

O índice de performance pode ser calculado tanto para itens individuais como para mais de um equipamento, que são capazes de compor uma única contingência. Determinada a contingência desejada para cálculo do IP, é necessário seguir alguns passos para se chegar a um resultado, estes cálculos serão detalhados nos próximos parágrafos.

O primeiro passo é determinado pelo cálculo do fluxo de potência com o estado atual da rede, logo se retira um ou mais itens que representam a contingência desejada, um novo cálculo do fluxo de potência é executado e assim o cálculo de fluxo de potência sofre o ajuste para funcionamento da rede sem o(s) equipamento(s) sob contingência. Após o cálculo de cada índice de performance necessário, é obtida uma lista que se pode ordenar iniciando pelos maiores valores, com isso terá no início da lista as contingências mais importantes da rede em questão.

A título de exemplificar, nos próximos parágrafos são mostrados os passos para o cálculo de IP sendo executado para uma rede fictícia de 3 vértices e 3 ramos.

Na figura 6, há o *layout* inicial da rede, onde o nó 1 é definido como gerador, e os nós 2 e 3 como cargas que devem ser atendidas. Cada carga que deve ser atendida necessita de 1 unidade, o gerador está atendendo as 2 unidades. Têm-se 3 ramos de distribuição, onde seus limites são: ramo entre vértices 1 e 2 = 1,0 unidade, ramo entre vértices 1 e 3 = 1,5 unidades, ramo entre vértices 2 e 3 = 0,5 unidade. Para simplificar a visualização, os dados desta rede são apresentados nas tabelas 1 e 2, classificados em duas seções, a primeira identifica as barras e a segunda identifica os ramos.

**Tabela 1: Dados de barras da rede exemplo.**

Barra	Carga	Tipo
1	2	Gerador
2	1	Carga
3	1	Carga

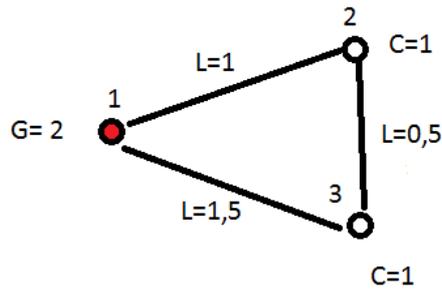
Fonte: desenvolvido pelo autor

Tabela 2: Dados dos ramos da rede exemplo.

Ramo	Limite
1-2	1,0
1-3	1,5
2-3	0,5

Fonte: desenvolvido pelo autor

Figura 6: Rede base e seus limites de operação.



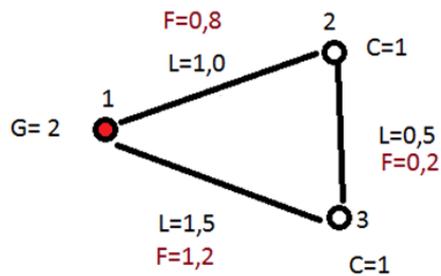
Fonte: desenvolvido pelo autor.

Como primeiro passo para o cálculo do IP, executa-se o processo de cálculo de fluxo de potência para a rede exibido na Figura 7, onde o resultado obtido para o atendimento das cargas é dado pelo fluxo de potência exibido na tabela 3.

Tabela 3: Fluxo de potência na rede sem restrição.

Ramo	Limite	Fluxo de Potência
1-2	1,0	0,8
1-3	1,5	1,2
2-3	0,5	0,2

Fonte: desenvolvido pelo autor.

Figura 7: Fluxo de potência atendido pela rede, demonstrado por  $F$ .

Fonte: desenvolvido pelo autor.

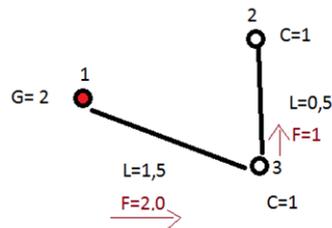
Na Figura 8, exibe-se o *layout* da rede após o cálculo do fluxo de potência com a contingência do ramo entre vértices 1 e 2. Os dados podem ser mais bem apreciados na tabela 4.

**Tabela 4: Dados do fluxo após contingência do ramo 1-2.**

Ramo	Limite	Fluxo de Potência	Valor da Violação
1-3	1,5	2,0	+0,5
2-3	0,5	1	+0,5

Fonte: desenvolvido pelo autor.

**Figura 8: Fluxo de potência para a contingência do ramo entre vértices 1 e 2.**



Fonte: desenvolvido pelo autor.

Com este resultado no cálculo do fluxo de potência, aplicamos a fórmula para cálculo do índice de performance, desta forma se mostra:  $IP = \left(\frac{2}{1,5}\right)^2 + \left(\frac{1}{0,5}\right)^2 = 5,77$ , este é o resultado do índice de performance para a contingência no ramo entre os vértices 1 e 2.

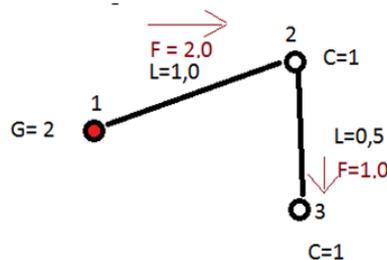
Na figura 9, nota-se a alteração da rede para contingência no ramo entre os vértices 1 e 3, também são exibidos os dados do resultado do cálculo do fluxo de potência. A Tabela 5 demonstra o resultado.

**Tabela 5: Fluxo de potência para restrição do ramo 1-3.**

Ramo	Limite	Fluxo de Potência	Valor da Violação
1-2	1,0	2,0	+1,0
2-3	0,5	1,0	+0,5

Fonte: desenvolvido pelo autor.

**Figura 9: Fluxo de potência para a contingência do ramo entre vértices 1 e 3.**



Fonte: desenvolvido pelo autor.

Para esta restrição aplica-se a mesma fórmula para obtermos o índice de performance assim mostra:  $IP = \left(\frac{2}{1}\right)^2 + \left(\frac{1}{0,5}\right)^2 = 8$ , este valor de IP para o ramo entre vértices 1 e 3.

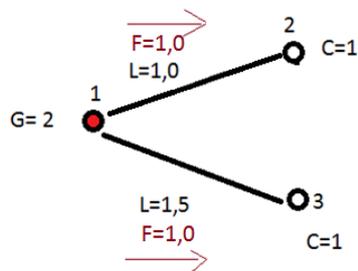
O terceiro exemplo de contingência considerado se dá no ramo entre os vértices 2 e 3, a direção do fluxo e o resultado do cálculo de FP pode ser visto na Figura 10 e melhor visualizada na tabela 6.

**Tabela 6: Fluxo de potência para restrição do ramo 2-3.**

Ramo	Limite	Fluxo de Potência	Valor da Violação
1-2	1,0	1,0	0
1-3	1,5	1,0	0

Fonte: desenvolvido pelo autor.

**Figura 10: Fluxo de potência para a contingência do ramo entre vértices 2 e 3.**



Fonte: desenvolvido pelo autor.

Por fim, calcula-se o IP para o último ramo da rede, entre os vértices 2 e 3, após a aplicação da mesma fórmula tem-se o  $IP = \frac{13}{9} = 1,44$ .

Com estes dados de saída para as 3 possíveis contingências simples, pode-se criar uma lista em ordem de importância para as restrições analisadas, resultando como análise do índice de performance para a rede dada na tabela 7:

**Tabela 7: Resultado sobre contingências mais importantes para rede.**

Ordem	Contingência	IP
1	Ramo 1-3	8,00
2	Ramo 1-2	5,77
3	Ramo 2-3	1,44

Fonte: desenvolvido pelo autor.

Com estes passos, é possível ter a visibilidade da importância de cada elemento da rede, porém todos estes passos para uma rede de tamanho real, agregando as restrições impostas pelos centros de controle, acaba por ser uma tarefa um tanto árdua. Desta forma o objetivo é que estes passos sejam calculados apenas para o resultado escolhido aleatoriamente dentro da vizinhança encontradas pelo algoritmo de SA, com o objetivo final em que o algoritmo de SA seja suficientemente capaz de direcionar as buscas para espaços onde ótimos globais sejam encontrados com um relativamente baixo número de análises sobre todos possíveis resultados da rede, conforme será detalhado a seguir.

Outro aspecto encontrado nas contingências é que desconexões impedem o cálculo do fluxo de potência, e levam o sistema a um desligamento total ou parcial, desta forma, o sistema entra em estado restaurativo, que deve ser avaliado por outro método, estes casos são considerados ainda mais grave de devem ter especial atenção com um diferente método de estudo, assim estes casos ficam de fora da lista ordenada de contingências, porem estas contingências são listadas para que uma posterior avaliação possa ser feita.

Neste trabalho é utilizado o *software* FP desenvolvido por Canto dos Santos (CANTO dos SANTOS & GARCIA, 1998). O *software* de Canto dos Santos recebe um arquivo com um formato de rede, onde a entrada dos dados é feita por um arquivo com duas seções, que servem para definir o *layout* da rede; na primeira seção constam os dados sobre barras da rede e na segunda seção os dados sobre ramos. Após o processamento do *software* é gerado um arquivo composto por todas as linhas de transmissão da rede, esse contém os dados sobre o fluxo de potência de cada ramo da rede individualmente para cada sentido do fluxo.

A utilização do *software* comercial ANAREDE da empresa CEPTEL também foi analisada para o cálculo do fluxo de potência, esse *software* requer licença para execução, em contrapartida esse *software* contém ferramentas específicas que calculam o índice de performance de cada item da rede, utilizando técnicas específicas, que poderiam auxiliar no desenvolvimento da ferramenta metaheurística proposta neste trabalho.

Conforme visto previamente, o método clássico é exaustivo e consiste em rodar o Fluxo de Potência e utilizar um Índice de Performance para medir cada uma das contingências de ordem  $K$  possíveis (MONTICELLI, 1983). Portanto, existem duas abordagens possíveis que podem ser consideradas para a Análise de Contingências: reduzir a quantidade de casos analisados ou analisar os casos de forma eficiente. No cenário de redução dos casos a serem analisados, propõe-se aqui o uso do algoritmo de SA para seleção de contingências mais graves, sendo este o principal objetivo deste trabalho.

### 4.3 Solução Inicial para o algoritmo de *Simulated Annealing*

Para a solução inicial do algoritmo de SA, diversos autores (ABDELAZIZ & MEKHAMER, 2013), (COLLINS, 1988), (MOUSTAFA, 2014) descrevem que o desempenho do algoritmo tem uma significativa melhora se a solução inicial já tenha um resultado considerado bom e, com isso, o tempo total de processamento tem uma considerável redução.

Inicialmente, será utilizada uma única solução inicial  $s_0$  é definida randomicamente. Posteriormente, na fase de testes é possível o desenvolvimento e uso de alguma heurística, podendo assim ser testada e comparada, diferentes tipos de heurísticas podem ser aplicados, e por meio de testes verificar o impacto que cada heurística tem sobre o resultado final no algoritmo.

### 4.4 Geração da vizinhança do SA

A geração de vizinhança do SA é responsável por gerar soluções próximas à atual, diversos pesquisadores, tais como (CERNY, 1985) e (CHARON, 2002) afirmam que a eficiência de SA depende diretamente da estrutura de vizinhança utilizada no algoritmo.

A geração de vizinhos é responsável por obter soluções que vão direcionar o algoritmo. Desta forma a geração de vizinhança deve permitir buscas locais que permitem o algoritmo direcionar para um valor ótimo da função objetivo. Além disto, a geração de vizinhança é encarregada por perturbações, que permite o algoritmo a fugir de ótimos locais, estas perturbações são geradas por um algoritmo específico detalhado neste capítulo.

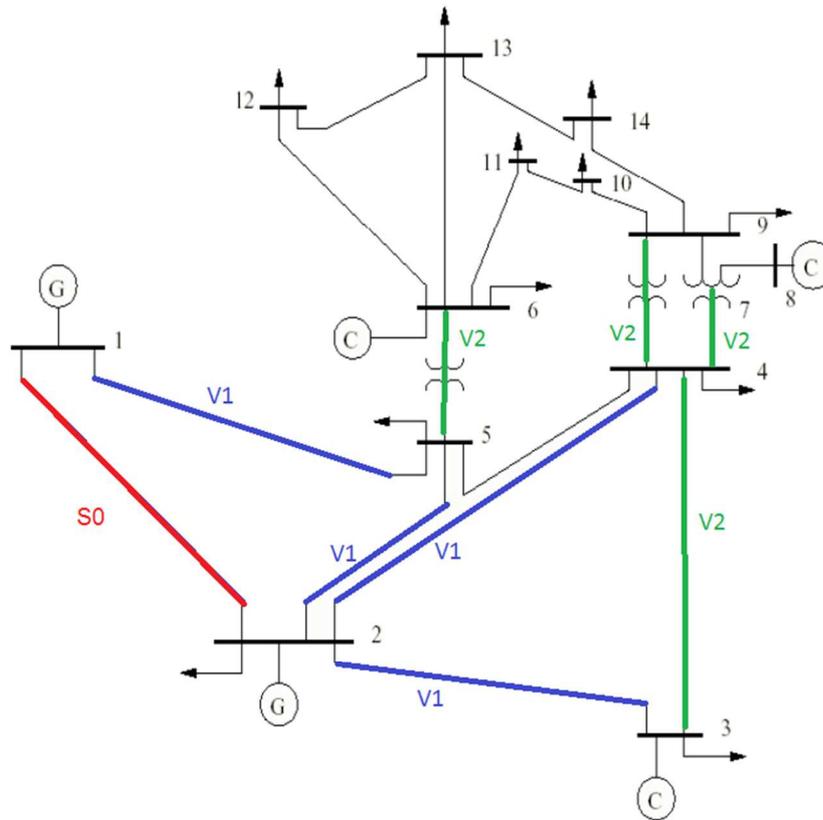
Para a geração de vizinhança, o algoritmo parte de uma solução  $s$  válida, e esta solução serve como ponto inicial para geração da vizinhança. Partindo deste ponto, soluções vizinhas são geradas, obedecendo regras definidas nos próximos parágrafos. Essa vizinhança pode conter vários níveis, onde a vizinhança de nível 1 é formada pelas conexões que ligam diretamente aos vértices da restrição atualmente avaliada. Para o nível 2 de vizinhança, são consideradas todas as conexões que ligam diretamente nos vértices que pertencem à vizinhança de nível 1 e, assim sucessivamente, é possível ir gerando níveis de vizinhança até atingir toda a rede. Alguma demora foi percebida para que perturbações ocorressem, onde perturbações não estavam sendo eficientes, foi verificado que alguns autores descrevem a possibilidade de inserção de um vizinho totalmente aleatório (RUTENBAR R. A., 1987), (MOUSTAFA, 2014).

Como exemplo na figura 12, onde a contingência analisada é, entre as barras 1 e 2, na figura está demonstrada a vizinhança em primeiro nível V1 e a vizinhança no segundo nível V2. Cada um dos ramos destacados na figura 12 pode ser visto individualmente como uma solução vizinha, sendo assim, para uma vizinhança nível 1 (V1 na figura 12) tem a possibilidade de 4 diferentes soluções vizinhas utilizando apenas a técnica de *swap*, que é apenas a troca entre ramos da restrição.

Para aumentar a possibilidade da geração de vizinhança há a possibilidade de utilização de duas técnicas: a primeira possibilidade é utilizar os próximos níveis da vizinhança, que consiste na substituição da restrição atual por ramos mais afastados da restrição atual avaliada (exemplo vizinhança segundo nível, V2 na figura 12); a segunda possibilidade é a inclusão de um ramo aleatório da rede dentro dos possíveis vizinhos, sendo essa técnica responsável por gerar uma maior diversificação da vizinhança.

Quando mais de uma contingência é avaliada, o processo é exatamente o mesmo, executado repetidamente para cada contingência independente. A única restrição é que os ramos das duas contingências não sejam compostos pelos mesmos ramos.

Figura 11: Exemplo de geração de vizinhança para 2 níveis.



Fonte: desenvolvido pelo autor.

#### 4.5 Definição dos parâmetros para SA

Existem alguns parâmetros que devem ser definidos antes da execução de qualquer algoritmo de SA, vários autores descrevem as mais diversas formas de obter a sintonia dos mesmos, mas que, em suma, os parâmetros são diretamente dependentes do problema a ser resolvido e da modelagem adotada, assim esses parâmetros são sintonizados com base em testes de execução e avaliação de desempenho (ABDELAZIZ & MEKHAMER, 2013).

A seguir, é definido como serão escolhidos os diversos parâmetros para o algoritmo de SA, explicando-se o funcionamento e algumas melhorias que podem ser feitas para cada parâmetro.

- **T inicial:** Moustafa (2014), descreve que a temperatura inicial deve possibilitar que qualquer resultado obtido na vizinhança possa ser escolhido como próximo estado do algoritmo. Em geral, um valor aleatório pode ser definido, porém como base pode ser executada uma busca pelo pior resultado da primeira geração de vizinhança (RUTENBAR, 1992). Em suma, um intervalo de valores é testado neste trabalho, assim diferentes temperaturas iniciais podem ser verificadas, onde esses intervalos foram escolhidos por meios de testes prévios. Uma análise sobre a primeira iteração do algoritmo é feita para definir a primeira *Tini*, e definida pelo maior resultado

obtido pela equação  $Tini = (s' - s)^2$ , calculado para todos os possíveis vizinhos da primeira iteração.

- **Função de custo:** a função de custo é responsável por guiar o algoritmo, para este trabalho é definida valores da formulação do índice de performance, assim o algoritmo percorrerá o espaço de busca avaliando os valores do IP de cada contingência avaliada, sendo que a fórmula para este cálculo pode ser vista na equação (2) (GERHARDT, 2007).
- **Fórmula de resfriamento:** a função de resfriamento contém 2 componentes, a configuração de temperatura inicial e a fórmula que define o resfriamento da temperatura. Essas duas informações são determinadas empiricamente com base em testes prévios do problema em questão, a fim de obter bons resultados para a característica do problema proposto. A temperatura inicial já tem um critério definido, o próximo passo na construção da fórmula de resfriamento, que é a escolha de uma regra para reduzir a temperatura. Neste trabalho a definição é dada com o fator  $\alpha$  para testes em que foram selecionados os valores 0,75, 0,85 e 0,96, sendo que esses valores permitem diferentes comportamentos do algoritmo com resfriamentos mais rápidos e resfriamentos mais lentos, permitindo boas comparações sobre o comportamento do algoritmo.
- **Critério de aceitação:** esse é responsável por definir quando um novo estado do problema pode se deslocar para resultados onde a função objetivo sofre uma piora, o maior objetivo desse parâmetro é permitir o algoritmo se mover a novos espaços de busca, a fim de fugir de ótimos locais. Esse critério é definido pela fórmula apresentada do algoritmo de SA, que foi citada na equação (3) anteriormente, sendo  $r$  um número aleatório com distribuição normal entre 0 e 1 com semente gerada randomicamente.

#### 4.6 Critério de Parada

Ao decorrer das iterações o valor da temperatura  $T$  sofre diminuição conforme formula de resfriamento, desta forma é necessário que seja definido um critério de parada para o algoritmo, que defina o final do processo.

O critério de parada para algoritmos de SA é definido como quando o material atinge o congelamento, como descrito no capítulo 3.

Para este trabalho a temperatura inicial  $T_0$  é definida no início do processo como parâmetro, e seu valor via sendo decrescido conforme constante  $\alpha$  (alpha), no algoritmo é feita a comparação  $T < 0,8$ , quando esta condição é satisfeita é considerado como congelamento e atingido critério de parada.

## 4.7 Reannealing

Alguns testes utilizaram o *reannealing*, na implementação do algoritmo este foi implementado para que a temperatura do sistema retorne a temperatura inicial do processo, mantendo a atual configuração do sistema. O número de vezes que a temperatura retorna ao parâmetro inicial é definido pelo parâmetro de *reannealing*. O momento que a temperatura sofre o reaquecimento é quando a função do critério de parada é atingido, o parâmetro é verificado, e então o algoritmo finaliza, ou reaquece a temperatura, conforme parametrização definida no início.

## 4.8 Validação dos Resultados

A validação do algoritmo foi verificada com análises sobre os resultados obtidos pelo método exato comparado aos resultados obtidos pelo SAVFP. Execuções utilizando parametrização onde toda a área de busca fosse atingida para o algoritmo de SAVFP, extraíndo e comparando os resultados com os encontrados pelo método clássico, desta forma, a igualdade dos resultados encontrados pelos dois métodos e verificado para diferentes problemas afirmam o funcionamento do algoritmo.

Para comparativo dos resultados deste trabalho, os sistemas elétricos de potência utilizados para os testes foram IEEE30 e rede sul brasileira com 810 barras e 1340 ramos. Para essas duas redes foram geradas análises de contingências pelo método clássico, utilizando o *software* ANAREDE. Obtidos os resultados pelo método clássico é possível calcular a taxa de captura obtida pelo algoritmo de SA, assim obtendo a eficácia do algoritmo.

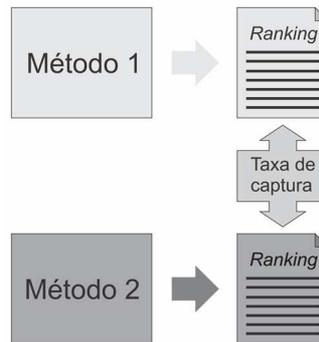
O método utilizado na comparação dos valores é o método conhecido como taxa de captura, em comparação com os resultados obtidos pelo método tradicional. Método semelhante foi utilizado por Farias Costa (FARIAS COSTA, 2011) onde, na comparação de algoritmos genéticos com métodos exatos, foi possível validar os resultados e mostrar a eficácia dos resultados encontrados.

### 4.8.1 Taxa de captura

Taxa de captura ( $T_c$ ) é o cálculo responsável por expressar de forma algébrica o quanto um resultado está contido em outro na comparação de dois resultados distintos (QUINTELA, 2002), (ALBUQUERQUE, 2005). Para a avaliação deste trabalho, é utilizado uma lista dos melhores resultados encontrado pelo cálculo via método clássico, onde todas as possibilidades são testadas chegando ao resultado exato do problema. Desta forma, as saídas encontradas pela aplicação deste trabalho são comparado pelo método de taxa de captura, tendo como resultado o quanto o algoritmo de SA se aproxima do resultado clássico.

Na figura 13, nota-se como o método de taxa de captura analisa os resultados de diferentes métodos:

**Figura 12: Comparação utilizando método da taxa de captura.**



Fonte: (FARIAS COSTA, 2011).

A formulação da taxa de captura é expressa pela fórmula:

$$Tc = \frac{K(P)}{N} \cdot 100, \quad (7)$$

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 aparecem nas  $P$  posições iniciais da lista.

Com os resultados dos métodos deste trabalho com emprego de *Simulated Annealing* e obtidos pelo método clássico com o processamento no *software* ANAREDE, o método de taxa de captura é aplicado. Com base nesses resultados, será feita uma análise sobre a eficácia do algoritmo de SA para o problema de Seleção de Contingências no problema de análise de segurança em sistemas elétricos de potência.



## 5 TESTES E RESULTADOS

O principal objetivo deste trabalho é desenvolver uma ferramenta capaz de encontrar as contingências simples e múltiplas mais graves em uma rede de grande porte para a parte ativa do problema em um tempo hábil para os centros de controle. É um problema que possui restrições severas de tempo em ambientes reais de operação, e por esse motivo diversas abordagens vêm sendo testadas e elaboradas nas últimas décadas. Durante a seção de revisão bibliográfica, se verificou trabalhos nas áreas de matemática aplicada, otimização combinatória e também inteligência artificial.

Todos os métodos pesquisados buscam um compromisso entre eficácia e eficiência. Os resultados esperados pela abordagem mostrada neste trabalho são manter a eficácia da localização de contingências severas e permitir que a eficiência seja alcançada através da rápida convergência das avaliações do algoritmo de SA.

A aplicação do algoritmo proposto foi executada em duas diferentes redes, primeiramente uma rede pequena conhecida como IEEE30 foi utilizada para obter resultados e validá-los, bem como sintonizar o algoritmo. Posteriormente, esse mesmo foi aplicado para a rede real sul brasileira com 810 barras, no intuito de verificar e validar a aplicação o mais próximo de situações reais de utilização. Para a rede IEEE30, instâncias com  $K=1$  e  $K=2$  foram executadas, já para rede real 810 a instância  $K=1$  foi executada e sua validação foi verificada.

Os testes foram executados em um computador pessoal, com sistema operacional Windows versão 10, com processador i5-4210U com 1,7GHz e 8Gb de memória RAM. Nos resultados, também são apresentados contadores de tempo que apresentam quanto tempo o algoritmo processou até sua parada. Importante salientar que as comparações com outros algoritmos sofrem grandes diferenças na capacidade de processamento dos testes, assim como influências de prioridade do gerenciador do sistema operacional sobre o processo.

### 5.1 Detalhes da implementação

Como já descrito anteriormente, o projeto é desenvolvido em C#, com interface com usuário por linha de comando “CLI” pela simplicidade e facilidade de visualização e extração dos dados durante o processamento.

Inicialmente o projeto carrega todos os dados da rede a ser analisada de um arquivo .dat, esse que contém as informações do *layout* da rede colocando toda configuração da rede em memória. Durante a execução do algoritmo SA, é necessária a execução de um aplicativo externo que roda a análise de fluxo de potência por FCDR, que gera um novo arquivo de saída com dados sobre o fluxo de potência para a rede carregada. Além disso, esse arquivo de saída também é carregado para a memória do algoritmo de SA completando as informações necessárias para o algoritmo de SA fazer o seu processo de busca.

Alguns detalhes importantes do projeto de implementação são descritos abaixo, detalhes da implementação que ajudam a entender como opera a aplicação desenvolvida.

A geração de vizinhança ou perturbação do resultado é feita como descrito no capítulo anterior, utilizando o método de vizinhança. Para que o algoritmo não chame o aplicativo externo de cálculo de fluxo de potência repetidas vezes em um mesmo patamar de temperatura, foi criada uma estrutura de memória mantendo as restrições que já foram avaliadas para aquele

patamar de temperatura e evitando fazer o cálculo novamente, obrigando que o método de vizinhança evolua a novos possíveis vizinhos no mesmo nível de vizinhança (ex.: V1). Caso essa tentativa ultrapasse o número de máximo de iterações, o algoritmo passa para o nível de vizinhança V2 e permite encontrar novos possíveis resultados, ainda não testados para aquele patamar de temperatura.

Quando uma solução vizinha é selecionada os ramos correspondentes a contingência são retirados da estrutura atual da rede, então é executada uma nova chamada de fluxo de potência por FCDR. Conseqüentemente, os resultados são carregados para a rede e o cálculo do IP para o ramo é executado, logo tem como avaliar a importância do ramo para o atual *layout*.

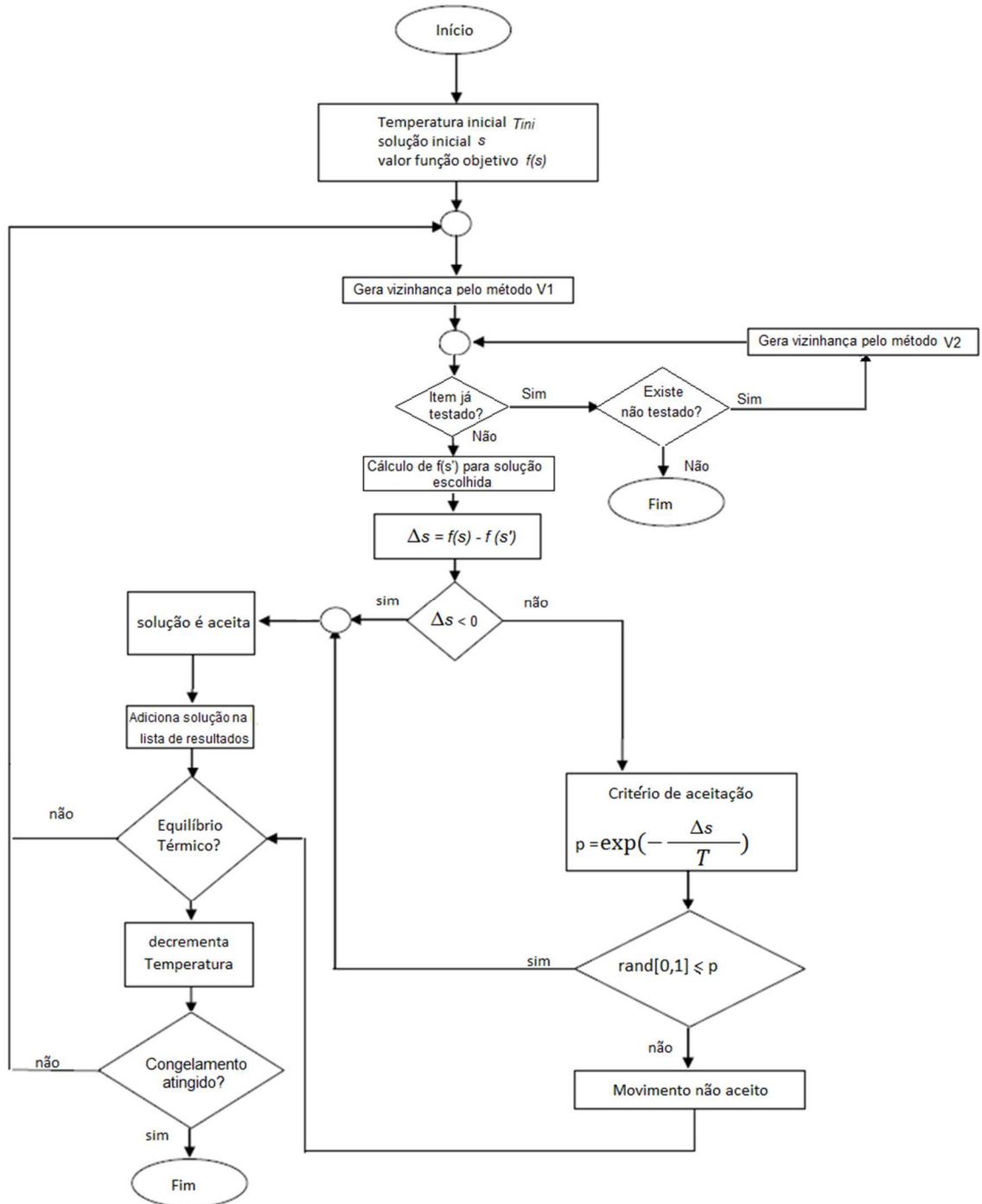
Tendo o valor de IP para uma nova solução perturbada é possível que o algoritmo de SA avalie os valores. A função objetivo do algoritmo utiliza o valor de IP assim para o ramo avaliado, o algoritmo verifica se tem um aumento do valor do IP, caso positivo essa solução é aceita como melhora e a solução atual do SA move-se para esse resultado. Caso o ramo testado tenha um resultado de piora, é aplicada a fórmula do critério de aceitação equação (3), caso seja aceito, o algoritmo move o resultado para esta solução avaliada, caso não seja aceito, é mantido o resultado atual, iniciando o processo de geração de vizinhança novamente.

Como o algoritmo de SA trabalha normalmente armazenando sempre o melhor resultado, e para este projeto é necessário que se tenha uma lista dos ramos mais importantes, foi criada uma lista cujo tamanho é definido por parametrização. Nessa lista, são armazenados os melhores resultados encontrados durante o processamento do algoritmo, então a cada iteração o resultado encontrado é comparado com os resultados contidos na lista, caso o encontrado seja melhor que algum item da lista, o novo é inserido removendo o item do fim da lista. Desse modo, a lista sempre fica atualizada com os melhores resultados, determinado durante o processamento, e no final pode ser consultada para avaliação.

Um detalhe sobre o trabalho é que para entrada e análise dos dados é utilizada uma única entrada de rede, sendo para esta entrada estática que a análise do sistema é executada. Como já descrito no capítulo 2, os sistemas reais sofrem constantes modificações no *layout*, mas mesmo com essas modificações o formato não se altera e o método proposto pode ser aplicado sobre um novo *layout* sem maiores problemas de compatibilidade.

Desta forma o fluxograma com as principais operações e sequencia de fluxo que o algoritmo executa é exibido na figura 13, que é baseado no fluxograma original do algoritmo de AS.

Figura 13: Fluxograma de Seleção de Contingências pelo método SA.



Fonte: desenvolvido pelo autor.

## 5.2 Resultados para rede IEEE30

A rede IEEE30 é uma rede com 30 barras e 41 ramos, é considerada uma rede de pequeno porte. Os testes são válidos para comparação e validação, podendo ser mais facilmente executados que em redes de grande porte.

As instâncias de  $K=1$  e  $K=2$  foram rodadas para essa rede. Como a rede é considerada pequena e a instância  $K=1$  é uma instância simples um grande número de testes foi realizado, porém muitos não são citados por não obterem significativos resultados.

### 5.2.1 Testes para instância IEEE30 $K=1$

A comparação dos resultados é feita com a lista dos dez melhores resultados obtidos pelo método clássico, os resultados do método clássico são apresentados na tabela 8.

**Tabela 8: Resultados para  $K=1$  obtidos via método clássico.**

	Severidade	Violações	De-> Para	ID ramo no S.A.
1	16,3	4	1->2	1
2	11	6	2->5	5
3	10,6	5	1->3	2
4	10,3	5	3->4	4
5	8,1	5	4->12	15
6	5,8	3	4->6	7
7	5,7	3	27->28	36
8	5,5	3	9->10	14
9	5,4	3	6->9	11
10	5,2	2	6->11	10

Fonte: desenvolvido pelo autor.

Para cada parametrização, o algoritmo de SA é executado trinta vezes, onde a faixa de parametrização foi escolhida empiricamente com base em testes realizados previamente. A seleção de cada parâmetro foi feita utilizando um valor considerado baixo para o parâmetro, uma segunda execução com um valor médio e para encerrar um valor considerado alto, ao final o cruzamento de todos os parâmetros foi executado, assim trazendo os resultados e variação com cada tipo de parametrização escolhida, podendo ser analisado o impacto da variação de cada parâmetro de entrada do algoritmo. A tabela 9 exibe todos os parâmetros testados, alguns parâmetros combinados não traziam resultados expressivos e foram omitidos.

Para obter os resultados, foram executadas trinta repetições para cada configuração, ao final das trinta repetições as médias da taxa de captura, espaço de busca atingido e tempo foram calculados. Os resultados obtidos podem ser verificados na Tabela 9, onde a coluna com o número médio de acertos expressa quantos dos 5 resultados da lista do SAVFP estão na lista dos 10 mais importantes do método exato.

**Tabela 9: Parâmetros e respectivos resultados IEEE30 e  $K=1$ .**

Identificador	Número de iterações	Alpha	T ini	Reannealing	Número médio de acertos	Desvio padrão	Média do espaço de busca	Tempo em min
1	2	0,55	10	0	3,66	2	7,86	0,007
2	2	0,55	10	1	4,60	2	12,80	0,017
3	2	0,55	20	0	4,03	2	9,33	0,011
4	2	0,55	20	1	4,56	2	12,90	0,017
5	4	0,55	10	0	4,70	2	13,90	0,021
6	4	0,55	10	1	4,97	1	18,57	0,035
7	4	0,85	10	0	5,00	0	24,46	0,070
8	4	0,85	5	1	5,00	0	24,06	0,100
9	2	0,90	5	0	4,27	2	12,83	0,051
10	2	0,90	5	1	4,90	1	18,63	0,070

Fonte: desenvolvido pelo autor.

Os dados apresentados na Tabela 10 expressam a média percentual de acerto e área de busca atingida. Dados permitem uma verificação detalhada do desempenho do SA para o problema.

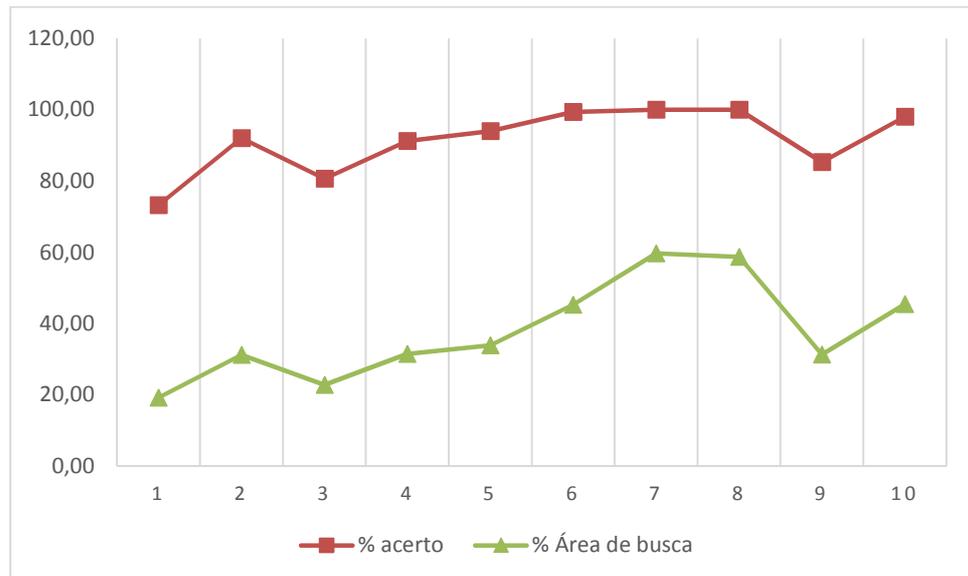
**Tabela 10: Análise dos resultados, rede IEEE30 com  $K=1$ .**

Identificador	% acertos	% Área de busca
1	73,20	19,17
2	92,00	31,22
3	80,60	22,76
4	91,20	31,46
5	94,00	33,90
6	99,32	45,28
7	100,00	59,66
8	100,00	58,68
9	85,32	31,29
10	98,00	45,45

Fonte: desenvolvido pelo autor.

Os resultados obtidos são satisfatórios, ou seja, para dada configuração de parâmetros, quando o algoritmo atingiu áreas de busca acima de 33,9%, o percentual de acerto da taxa de captura é acima de 94%. Esses resultados somente foram atingidos após uma sintonia fina dos parâmetros para o algoritmo.

No gráfico 1, é possível visualizar a evolução durante a sintonia dos parâmetros para o problema. É possível visualizar que as alterações de alguns parâmetros resultam um melhor percentual de acerto, e que quando espaços de busca acima de 20% do total são atingidos, resultados acima de 80% de acerto são atingidos.

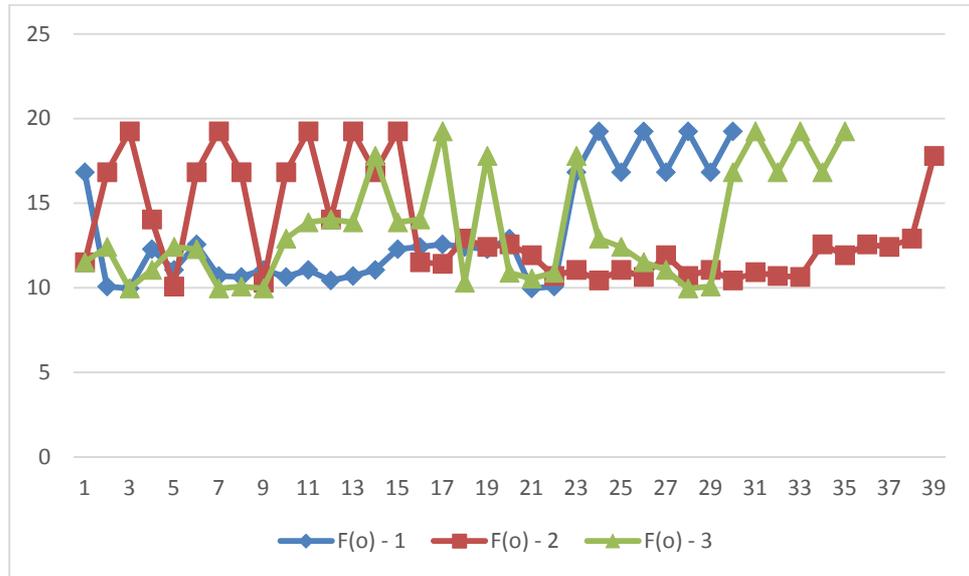
**Gráfico 1: Tamanho do espaço de busca e função objetivo.**

Fonte: desenvolvido pelo autor.

Analisando os resultados é possível concluir que 100% de acerto pode ser atingido com um pouco mais da metade do total da área de busca, o objetivo é ter grande precisão nos resultados, mas também que seja eficiente, por isso é de grande importância avaliarmos os resultados obtidos pela configuração do identificado 5, que atinge 94% de acerto com uma área de busca de apenas 33,9%, ou seja, com um pequeno relaxamento na qualidade do resultado é possível um grande incremento na eficiência do resultado. Para este resultado os parâmetros combinados são de 4 iterações, alpha de 0,55 e com Tini de 10, ou seja, temos um número alto de iterações com um resfriamento rápido e um Tini relativamente baixo dentre os testes realizados para este problema.

O algoritmo de SA permite que no início da sua execução as soluções de piora sejam aceitas pela alta temperatura definida inicialmente, em que ao longo das iterações essa temperatura sofre resfriamento, o que diminui a probabilidade de aceitação de resultados com piora na função objetivo. A demonstração desse comportamento da função objetivo durante as iterações pode ser visualizada no gráfico 2, que demonstra três distintas execuções para o conjunto de parâmetros do identificador 7 (vide tabela 9).

**Gráfico 2: Movimentos da FO do algoritmo de SA.**



Fonte: desenvolvido pelo autor.

### 5.2.2 Testes para instância IEEE30 K=2

O tamanho do espaço de busca é aumentado em uma explosão combinatória quando mais de um item compõe uma contingência. Para esse caso, em específico na rede IEEE30, quando uma contingência é dada como simples, o tamanho total do espaço de busca é igual ao número de ramos, para esse 41, quando é utilizada a possibilidade de 2 equipamentos comporem uma contingência, o tamanho do espaço total de busca cresce para 820 combinações, calculados pela resolução da equação (6).

Para esses testes, são comparados os dez melhores resultados encontrados pelo método clássico executado pelo ANAREDE, para a lista de 5 melhores do SAVFP. Também são apresentados os tamanhos dos espaços de busca atingidos pelo algoritmo a cada combinação de parâmetros.

Para os testes desta instância os parâmetros combinados pela tabela 11 foram combinados, alguns parâmetros combinados não retornam resultados com relevância, por isso alguns foram omitidos.

**Tabela 11: Parâmetros de teste.**

Número de Iterações	Alpha	Tini	Reannealing
{2;4;6;8}	{0,65;0,75; 0,85;0,96}	{10;20;30;40}	{0;1;2}

Fonte: desenvolvido pelo autor.

A Tabela 12 expressa todos os parâmetros utilizados para os testes assim como é possível verificar os resultados de cada parametrização, que estão expressos com o cálculo da média dos resultados obtidos a partir de um total de 30 execuções.

**Tabela 12: Parametrização do SA para rede IEEE30 com K=2.**

Identificador	Iterações	Alpha	Tini	Reannealing	Número médio de acertos	Desvio Padrão	Média do espaço de busca	Tempo médio em min
1	2	0,65	20	0	1,00	3	14,10	0,01
2	4	0,65	20	0	1,10	3	28,70	0,02
3	4	0,75	20	0	1,50	4	48,00	0,02
4	4	0,75	20	1	2,00	5	85,90	0,04
5	8	0,75	20	0	2,70	5	85,00	0,04
6	8	0,75	20	1	4,30	3	167,20	0,09
7	8	0,85	20	0	3,60	3	140,70	0,08
8	8	0,85	20	1	4,60	3	276,00	0,15
9	8	0,96	20	0	5,00	0	528,00	0,29
10	8	0,85	40	1	5,00	0	344,30	0,19
11	8	0,85	30	1	4,80	2	320,70	0,17
12	6	0,85	40	1	4,00	3	264,00	0,14
13	4	0,96	20	0	5,00	0	270,20	0,14
14	4	0,96	20	1	5,00	0	527,80	0,30
15	6	0,85	40	0	3,10	4	134,60	0,07
16	6	0,85	20	2	4,70	2	312,40	0,17
17	6	0,96	10	0	5,00	0	313,90	0,17
18	4	0,96	10	0	4,90	1	210,20	0,11
19	2	0,96	20	0	3,10	4	138,00	0,07
20	2	0,96	20	1	4,80	1	274,40	0,18

Fonte: desenvolvido pelo autor.

Para uma melhor análise dos dados, as informações da Tabela 12 foram normalizadas e ordenadas, assim podendo ser analisada a evolução dos resultados assim que os parâmetros são sintonizados, que pode ser verificado na Tabela 13.

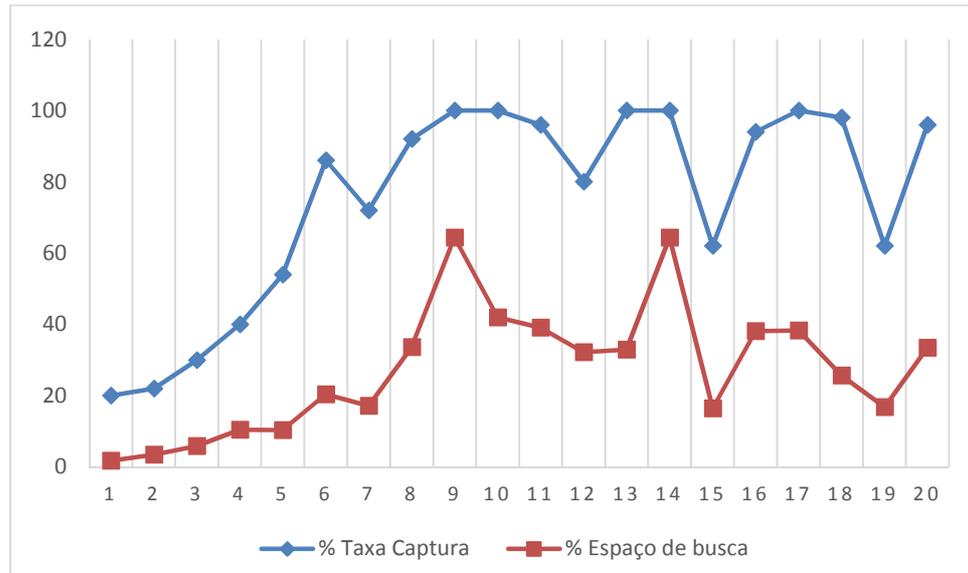
**Tabela 13: Resultados obtidos para rede IEEE30 em K=2.**

Identificador	% acertos	% Espaço de busca
1	20	1,72
2	22	3,50
3	30	5,85
4	40	10,48
5	54	10,37
6	86	20,39
7	72	17,16
8	92	33,66
9	100	64,39
10	100	41,99
11	96	39,11
12	80	32,20
13	100	32,95
14	100	64,37
15	62	16,41
16	94	38,10
17	100	38,28
18	98	25,63
19	62	16,83
20	96	33,46

Fonte: desenvolvido pelo autor.

Para os resultados obtidos, o Gráfico 3 demonstra o crescimento da assertividade da taxa de captura conforme o tamanho do espaço de busca é aumentado pelo ajuste da parametrização, e é visto um elevado crescimento na assertividade proporcional ao tamanho da busca, sendo este um comportamento que é esperado para problemas de otimização com funções objetivo de maximização.

**Gráfico 3: Evolução de FO ao espaço de busca pesquisado.**



Fonte: desenvolvido pelo autor.

É importante salientar os resultados obtidos pela parametrização de identificador 18, que atinge uma média de acerto de 98% com apenas 25,63% da área de busca. Para chegar a este resultado os parâmetros combinados são formados por número de iterações 4, alpha 0,96 Tini 10 e sem *reannealing*, estes parâmetros forma uma combinação com um número intermediário de iteração com resfriamento lento e Tini baixo para os parâmetros testados neste problema.

### 5.3 Resultados para a rede real Sul Brasileira com 810 barras para K=1

A rede real sul brasileira contém 810 barras e 1.340 ramos, e para a instância  $K=1$  o tamanho total do espaço de busca é igual ao número de ramos. Para validação dos resultados, consideram-se os dez melhores resultados encontrados por SA e é calculada a taxa de captura sobre as vinte contingências mais graves encontradas pelo método clássico via *software* ANAREDE.

Para essa rede, realizaram-se inúmeros testes com diferentes parametrizações do algoritmo de SA, a fim de serem feitas análises sobre a qualidade dos resultados e eficiência do algoritmo. Na tabela 14, observam-se os intervalos de parâmetros que foram utilizados nos testes dessa instância. Dentro dos intervalos específicos da tabela é possível se obter inúmeros conjuntos de parâmetros para testes, dessa maneira alguns testes foram executados e a lista de parâmetros foi reduzida, eliminando os parâmetros que não levaram a significativos resultados, mesmo assim a Tabela 15 contém todos os parâmetros testados.

**Tabela 14: Tabela de parâmetros de SA para execução de testes.**

Número de Iterações	Alpha	Tini	Reannealing
{2;4;6;8}	{0,65;0,75; 0,85;0,96}	{10;20;30;40}	{0;1;2}

Fonte: desenvolvido pelo autor.

Na tabela 15 estão os parâmetros combinados que retornaram os melhores resultados. Esses parâmetros foram definidos por meio de testes executados previamente e que foram parâmetros de maior relevância no objetivo do trabalho.

**Tabela 15: Parâmetros do SA para rede 810 em K=1.**

Identificar do caso	Número de Iterações	Alpha	Tini	Reannealing
1	2	0,75	200	0
2	2	0,75	200	1
3	2	0,75	2000	0
4	2	0,85	800	0
5	2	0,85	800	1
6	2	0,85	2000	0
7	4	0,85	2000	1
8	2	0,96	200	0
9	2	0,96	200	1
10	2	0,96	800	1
11	4	0,96	2000	0
12	8	0,75	200	1
13	8	0,75	200	2
14	8	0,85	200	1
15	12	0,75	200	0
16	12	0,75	200	1
17	12	0,75	800	0
18	12	0,75	800	1
19	12	0,75	2000	0
20	12	0,75	2000	1
21	12	0,85	200	0
22	12	0,85	200	1
23	12	0,85	800	0
24	12	0,85	800	1
25	8	0,8	250	1
26	8	0,8	400	1
27	12	0,96	200	0
28	25	0,75	200	0
29	25	0,75	200	1
30	25	0,75	800	0
31	25	0,75	800	1

Fonte: desenvolvido pelo autor.

Para cada conjunto de parâmetros foram feitas trinta execuções e no final delas é calculada a média das taxas de captura, assim como a média do tamanho total do espaço de busca e do tempo obtido pelo processamento. Esses resultados podem ser vistos na tabela 16.

**Tabela 16: Resultados obtidos para cada parametrização.**

Identificador do caso	Número médio de acertos	Desvio Padrão	Média da área de busca	Média Tempo (minutos)
1	3,2	5	29,0	0,20
2	4,7	9	64,0	0,42
3	2,4	6	48,9	0,30
4	3,8	7	69,5	0,44
5	6,4	7	131,9	0,84
6	2,8	7	80,6	0,55
7	8,8	6	310,8	1,97
8	8,0	6	199,7	1,32
9	9,7	3	386,4	2,60
10	8,1	7	233,5	1,90
11	9,9	1	591,6	3,99
12	8,2	2	229,8	1,57
13	9,6	4	341,1	2,36
14	10,0	0	382,8	2,79
15	8,1	8	179,6	1,23
16	9,6	3	346,8	2,46
17	6,4	7	240,0	1,53
18	9,5	2	457,2	3,15
19	7,3	9	266,2	1,80
20	9,8	1	518,8	3,43
21	8,3	7	300,1	2,02
22	10,0	0	609,2	4,26
23	10,0	0	795,3	5,60
24	10,0	0	796,1	5,30
25	8,6	7	309,0	2,10
26	8,2	9	332,2	2,30
27	10,0	0	1072,8	8,68
28	9,3	4	370,6	2,54
29	10,0	0	756,7	5,22
30	9,8	2	470,0	3,12
31	10,0	0	986,8	6,60

Fonte: desenvolvido pelo autor.

É possível verificar que uma taxa de captura adequada é obtida assim que os parâmetros de configuração do algoritmo são melhor sintonizados para o problema enfocado. Para uma melhor visualização da eficácia do algoritmo, os dados são apresentados de forma normalizada, apresentando os percentuais de acerto e tamanho dos espaços de busca para o problema. Esses dados podem ser visualizados na tabela 17.

**Tabela 17: Análise dos resultados para rede 810 barras.**

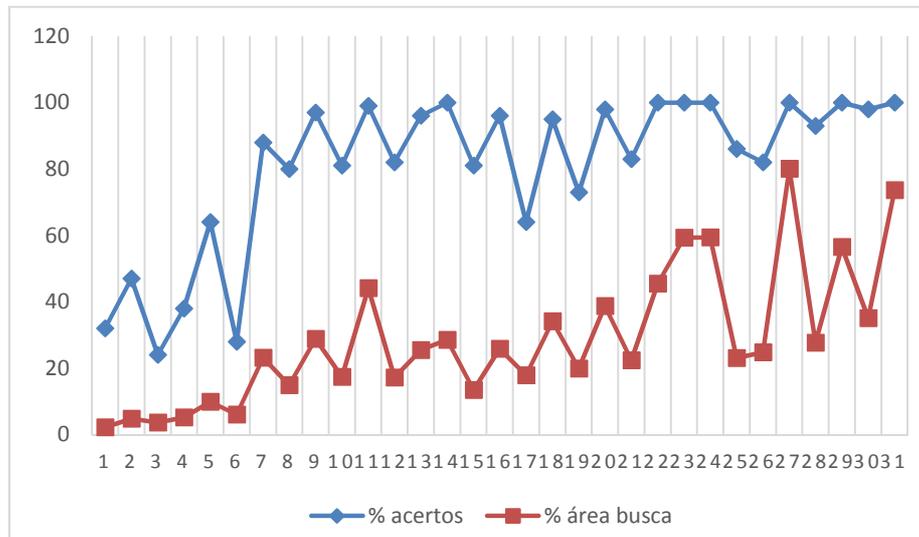
Identificador do caso	% acertos	% área busca
1	32	2,16
2	47	4,78
3	24	3,65
4	38	5,19
5	64	9,84
6	28	6,01
7	88	23,19
8	80	14,90
9	97	28,84
10	81	17,43
11	99	44,15
12	82	17,15
13	96	25,46
14	100	28,57
15	81	13,40
16	96	25,88
17	64	17,91
18	95	34,12
19	73	19,87
20	98	38,72
21	83	22,40
22	100	45,46
23	100	59,35
24	100	59,41
25	86	23,06
26	82	24,79
27	100	80,06
28	93	27,66
29	100	56,47
30	98	35,07
31	100	73,64

Fonte: desenvolvido pelo autor.

Analisando os resultados, é possível verificar que com dadas parametrizações o total de 96% de eficácia é atingido com apenas 25,88% do espaço total de varredura. Tais resultados são vistos como satisfatórios para o objetivo do trabalho, pois uma alta eficácia é atingida com espaço de busca restrito em um tempo de processamento abaixo de 2,5 minutos, considerando o *hardware* indicado anteriormente.

No gráfico 4, são apresentados os dados da taxa de captura em relação ao tamanho do espaço de busca atingido pelo algoritmo. Os resultados obtidos são satisfatórios do ponto de vista dos centros de controle, pois nenhum resultado levou um tempo maior que as restrições impostas pelos mesmos, inclusive quando a eficácia de acertos exigida é muito próxima a 100%. Em contrapartida, somente com esses resultados a totalidade do problema enfrentado nos centros de controle não é satisfeita, pois nessa seleção de contingências é preciso ser processada para contingências múltiplas, fato que aumenta o número de avaliações a serem executados. A eficácia e a eficiência já podem ser comprovadas pelos resultados obtidos até o momento. Sendo assim, o fato da totalidade do problema não ser atingido não é visto como grande problema, já que a paralelização do processamento pode ser uma das técnicas utilizadas para que o problema seja coberto na sua totalidade viabilizando o seu uso em centros de controle.

**Gráfico 4: Evolução da função objetivo pelo espaço de busca atingido.**



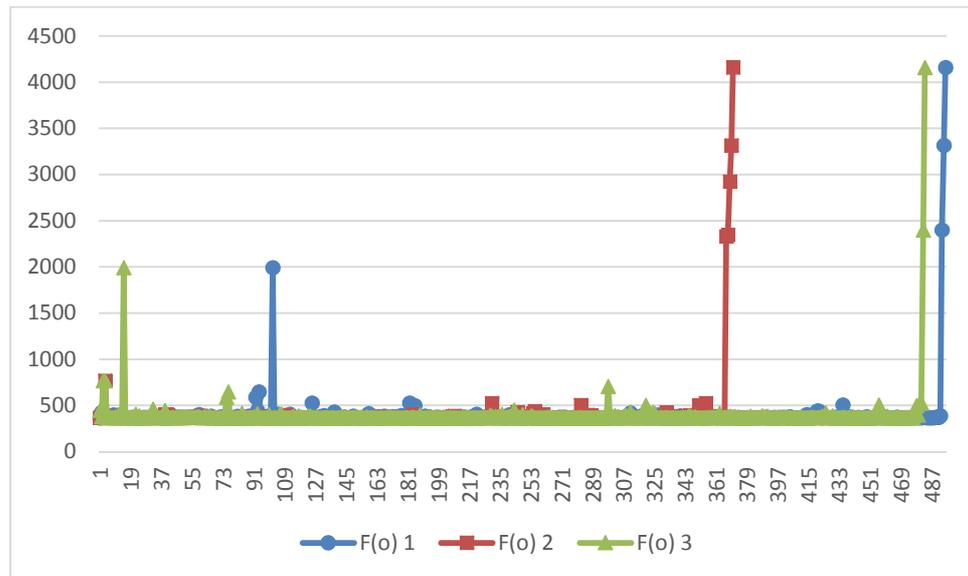
Fonte: desenvolvido pelo autor.

Analisando os resultados encontrados é possível avaliar que os parâmetros combinados do identificador 30 traz resultados considerados mais adequados para o objetivo. Onde 98% de acerto foi atingido com apenas 35,7% da área de busca na pesquisa. Na tabela 15 é possível visualizar que o número de iterações é alto dentre os testados o resfriamento é rápido utilizando uma *Tini* que teve um valor intermediário dentre os testados e não utilizando *reannealing*.

A fim de verificar a evolução do algoritmo de *Simulated Annealing* no decorrer das iterações, foram extraídos os valores da função objetivo a cada movimento que era aceito pelo algoritmo. Para essa verificação, foram realizadas três execuções da parametrização do caso número 20 (vide tabela 16), sendo esse escolhido por ser um caso onde resultados adequados para o objetivo do trabalho foram encontrados.

O Gráfico 5 relaciona o valor da função objetivo com o número da iteração em que esse valor é aceito como novo estado. É possível visualizar que no início da execução do algoritmo algumas soluções de piora são aceitas e no decorrer das iterações há o resfriamento de  $T$  diminuindo a probabilidade de aceitação de piora na função objetivo. Destaca-se que no final, a função objetivo converge para soluções de maximização e somente os valores de melhora foram aceitos, ou seja, após o resfriamento de  $T$  o algoritmo se deslocou a uma busca local pela maximização da função objetivo.

Gráfico 5: Evolução da função objetivo do SA.



Fonte: desenvolvido pelo autor.

#### 5.4 Resultados para a rede real Sul Brasileira 810, para K=2

Essa é a instância mais próxima de situações reais enfrentadas pelos centros de controle, onde o algoritmo é testado numa rede real simulando contingências duplas, que consiste na saída de operação de dois componentes simultâneos.

Para a instância da rede IEEE30, já foi demonstrado que este estudo obtém resultados satisfatórios, então devido à grande complexidade e tempos elevados de processamento, o número de testes foi reduzido. Com parametrizações utilizando o conhecimento e experiência do operador para escolha dos parâmetros.

A validação dos resultados que são obtidos pela aplicação, foi dada pela execução do algoritmo com parâmetros que permitiram o algoritmo explorar todo o espaço de busca possível do problema, desta forma ao final os resultados encontrados devem ser iguais ao resultado encontrado pelo método clássico ou exato. Ao final os resultados foram comparados com tabela apresentada no trabalho de Farias Costa (FARIAS COSTA, 2011), que descreve que obteve os resultados via método tradicional executado no *software* ANAREDE.

A parametrização inicial escolhida permitiu o algoritmo efetuar 897.130 testes sobre a rede em questão, com isto o número de desconexões existentes em contingências duplas pode ser calculado, sendo de 36,11% do total de testes verificados. Isto mostra um grande crescimento nos casos de desconexão comparados a contingências simples que foram de em média 11,7%, contando que para casos com instâncias de 3 equipamentos simultâneos sejam mais raros de acontecer, eles também causam um número muito grande de desconexões que por sua vez devem ser estudados via outros tipos de método, mais adequados para este tipo de problema.

Para esse teste como solução inicial foram utilizados os ramos que ligam as barras 80 a 154 e 750 e 757, escolhidos por estarem na lista de contingências mais graves da instância simples.

A taxa de captura foi calculada entre os 10 resultados mais importantes encontrados por *Simulated Annealing* dentre os 20 mais importantes encontrado pelo método clássico.

A tabela 18 apresenta os parâmetros combinados que foram testados para rede.

**Tabela 18: Parâmetros dos testes na rede 810 em K=2**

Identificador	Iterações	alpha	Tini	Reannealing
1	5	0,85	20000	1
2	5	0,85	20000	0
3	10	0,85	50000	1
4	10	0,96	50000	0
5	15	0,96	50000	0
6	20	0,96	50000	1
7	80	0,96	50000	4
8	3	0,95	20000	0
9	3	0,85	20000	0
10	5	0,96	5000	2

Fonte: desenvolvido pelo autor.

Estes parâmetros foram definidos conforme as execuções eram feitas, valores decididos pela experiência do usuário e testes. Na tabela 19, são apresentados os resultados das análises médias em trinta execuções.

**Tabela 19: Resultados dos testes na rede 810 para K=2.**

Identificador	Número médio de acertos	Desvio padrão	Média da área de busca	Média tempo em min.
1	9,45	2	492	1,69
2	7,40	9	260	0,89
3	8,70	7	1360	3,30
4	10	0	2710	6,90
5	10	0	5680	17,00
6	10	0	16350	50,00
7	10	0	225601	884,00
8	9,60	2	473	1,60
9	7,70	9	168	0,51
10	10	0	3225	8,00

Fonte: desenvolvido pelo autor.

Para melhor análise, os dados normalizados totalizam na tabela 20.

**Tabela 20: Dados normalizados rede 810 em K=2.**

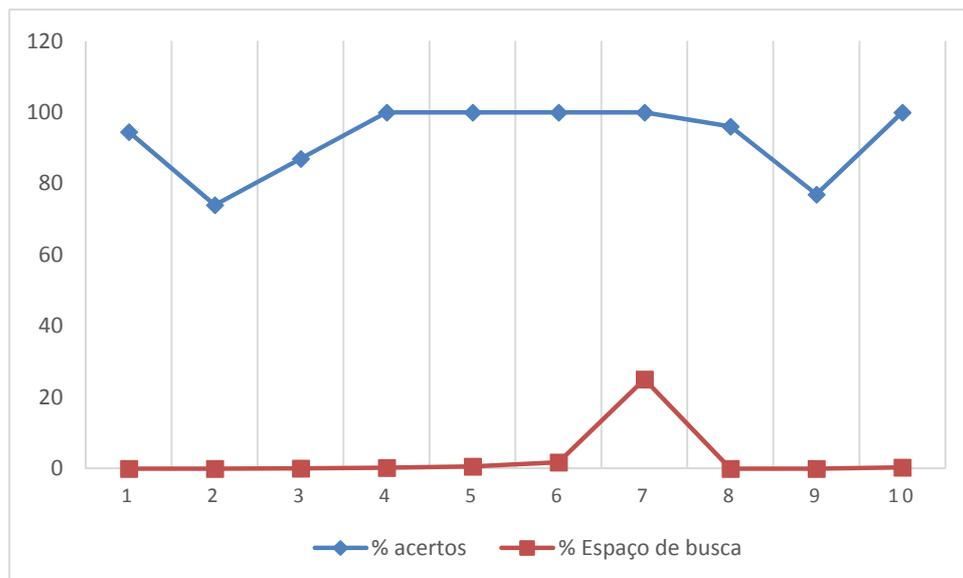
Identificador	% acertos	% Espaço de busca
1	94,5	0,054842
2	74,0	0,028981
3	87,0	0,151595
4	100	0,302074
5	100	0,633130
6	100	1,822478
7	100	25,146970
8	96,0	0,052724
9	77,0	0,018726
10	100	0,359480

Fonte: desenvolvido pelo autor.

É visto a qualidade dos resultados encontrados quando os parâmetros são sintonizados. O algoritmo conseguiu encontrar 100% da taxa de captura analisando apenas 0,63313% do espaço total de busca do problema em tempo computacional de 17 minutos em média. Este resultado supera expectativas do algoritmo, sendo que, acredita-se que a qualidade se deu ao fato dos mecanismos de busca local e geração de vizinhança terem sido otimizados para o problema.

O Gráfico 6 exibe a taxa de captura, e é possível visualizar a pequena área de busca atingida.

**Gráfico 6: Evolução da função objetivo e espaço de busca.**



Fonte: desenvolvido pelo autor.

Para ter resultados mais confiáveis e precisos sobre os processamentos, o caso do identificador número 1, além dos 30 processamentos que foram exibidos na tabela 19, foram feitas cem (100) novas execuções, e calculada a média de resultados, que são apresentados na tabela 21.

**Tabela 21: Cem execuções do caso 1 para rede 810 k=2.**

Identificador	Média de acertos	Desvio padrão	Média área de busca	Média tempo em min.
1	9,52	2	496,5	1,7

Fonte: desenvolvido pelo autor.

Analisando os resultados obtidos, é possível apontar o caso do identificador 8 que aponta um acerto de 96% de acerto com apenas 0,0527% da área de busca no processo. Os parâmetros responsáveis por este resultado são, 3 iterações considerado baixo para os testados, com um resfriamento lento dentre os testados e uma Tini média e sem *reannealing*.

## **5.5 Comparação entre os resultados obtidos pelo SAVFP e por Algoritmo Genético para o problema de Seleção de Contingências**

Como descrito na revisão de literatura, um trabalho semelhante foi desenvolvido por Farias Costa (FARIAS COSTA, 2011), desenvolvendo um algoritmo genético para o problema de seleção de contingências. Já para a validação, ele aplicou esse algoritmo para o problema de violação de fluxos de potência em ramos (AGFI) e também para o problema de violação de tensão em barras (AGTn), bem como a função objetivo dos dois problemas tem grande similaridade e por isso o mesmo algoritmo pode ser utilizado.

Com o intuito de comparar os resultados obtidos pelos dois trabalhos, os resultados de Farias Costa na aplicação de AGFI e os resultados de algoritmo SAVFP, para a instância da rede IEEE30 com  $K=2$  e SAVFP são comparados.

Farias Costa apresenta resultados de taxa de captura para sua melhor configuração com uma média de 80,17% das contingências mais graves, sendo que em 875 vezes num total de 1000 processamentos seu algoritmo encontrou a contingência mais grave do sistema com uma média de tempo de 11s de processamento.

Neste trabalho, o SAVFP dentre algumas diferentes parametrizações que levaram a bons resultados, vale destacar os parâmetros combinados do caso 18 (vide tabela 12) que obteve resultados de taxa de captura com uma média de 96% de acerto com uma varredura do espaço de busca de 25,63% em 11s de processamento.

Como comparativo é possível verificar que o algoritmo de AGFI tem melhor capacidade de direção em menores espaços de busca às expensas de tempo de processamento, já o algoritmo SAVFP possui uma capacidade de resultados eficazes com buscas em espaços de busca relativamente maiores, contudo os tempos de processamentos se assemelham. Desta forma os dois algoritmos apresentam resultados aceitáveis para a aplicação no problema em questão.

## 6 CONCLUSÃO

Grande parte dos sistemas produtivos e serviços dos quais se necessita, enquanto sociedade, depende da energia elétrica. Uma das tarefas executadas pelos engenheiros responsáveis pelo bom andamento do sistema de distribuição de energia elétrica é a Análise de Segurança em Sistemas Elétricos de Potência. Identificar possíveis distúrbios graves e se proteger deles através de ações de controle são tarefas importantes da execução da Análise de Segurança.

Partindo do pressuposto que a análise de segurança de modo *on-line* ainda é um desafio para os centros de controle devido ao tamanho dos SEP e as severas restrições de tempo, são encontrados na literatura alguns trabalhos que foram elaborados com o objetivo de facilitar o tratamento do problema. Nessa área, foram encontrados trabalhos que usam técnicas de matemática aplicada, otimização combinatória e também inteligência artificial como ferramentas de auxílio ao trabalho de análise de segurança.

Neste trabalho, foi aplicado o algoritmo de *Simulated Annealing* com o objetivo de as contingências mais graves sob o ponto de vista de violação do fluxo de potência nas linhas de transmissão. Os algoritmos de *Simulated Annealing* têm sido empregados em diversos tipos de problemas de otimização combinatória. Em revisão bibliográfica realizada, não foram encontrados trabalhos que tinham como objetivo a aplicação do algoritmo de *Simulated Annealing* para o problema de seleção de contingências em sistemas elétricos de potência. No presente trabalho, a seleção de contingências pelo método de triagem (*screening*) foi escolhida pela confiabilidade dos resultados sem mascaramentos. Embora sejam confiáveis eles dependem da execução do fluxo de potência que demanda um grande esforço computacional.

Após inúmeros testes em diferentes redes e instâncias, é possível verificar resultados satisfatórios ao objetivo do problema. Para que isso ocorra, é importante que os parâmetros do algoritmo de SA sejam sintonizados. Em SA existe um alto grau de aleatoriedade, isso impactou em parametrizações mais otimizadas tendo resultados que variaram entre 0% e 100% de acerto para uma mesma configuração de parâmetros em execuções distintas. Esse fenômeno causou que para atingir resultados com maior grau de confiabilidade, áreas de busca maiores devem ser consultadas, isto trazendo aos resultados incremento na confiabilidade e precisão dos resultados, as dispensas de um pouco mais de tempo de processamento.

Uma análise sobre as parametrizações para os diversos testes é possível realizar. Foi notado que para as 2 redes quando testado  $K=1$  os parâmetros para se chegar nos melhores resultados tenderam a ter grande número de iterações com parâmetro de resfriamento rápido, e que cada uma das redes tem sua Tini característica pelo tamanho do problema. Por outro lado, quando testes realizados em  $K=2$  estes parâmetros para chegar nos melhores resultados tiveram uma inversão, nos dois testes os parâmetros iterações tiveram um valor considerado baixo, com um resfriamento mais lento testado. Já Tini difere pelo tamanho do problema e valores da  $S$  e  $S'$ , e em nenhum dos testes o melhor resultado utilizou *reannealing*.

Os resultados obtidos pelo método proposto para a etapa de seleção de contingências em sistemas elétricos de potência são considerados de alta eficácia e eficiência após seus parâmetros de execução serem sintonizados. Porém, mesmo com os resultados obtidos os sistemas de grande porte podem precisar de grande poder computacional para que todas as possíveis contingências múltiplas sejam encontradas dentro dos prazos e restrições necessárias pelos centros de controle. Assim, as abordagens com algoritmos híbridos que combinam mais de uma técnica metaheurística e de processamento paralelo podem acrescer grandes ganhos para este trabalho, com o objetivo de utilização em sistemas reais.

Como trabalhos futuros ficam abertos diversos campos para incremento e melhoria dos resultados obtidos neste trabalho. Um trabalho futuro importante e que demandaria de um esforço relativamente baixo é aplicação deste mesmo algoritmo para o problema de violação de tensão nas barras, este problema se assemelha ao problema de violação nos fluxos de potências dos ramos, e com alguma adaptação na função objetivo e dados de leitura é possível a aplicação para o problema.

Outro trabalho futuro focado na melhoria do desempenho deste algoritmo é a aplicação de programação paralela e técnicas de processamento distribuído. Como foi verificado, o algoritmo melhora a qualidade dos resultados obtidos conforme maiores espaços de busca são pesquisados, distribuir o processamento em diversos núcleos de processamento pode trazer significativos ganhos na eficácia e eficiência.

## BIBLIOGRAFIA

- AARTS, E., & LENSTRA, J. K. (2003). *Local search in combinatorial optimization*. New Jersey - EUA: Princeton University Press.
- ABDELAZIZ, A., & MEKHAMER, S. F. (2013). Static Security Enhancement and Loss Minimization Using Simulated Annealing. *I.J. Intelligent Systems and Applications*, 30-42.
- ADIBI, M. M. (2000). Methodologies and Implementation. *POWER SYSTEM RESTORATION ISSUES - IEEE Power System Restoration Book*, 31-36.
- ALBUQUERQUE, M. d. (2005). Seleção de contingências com relação a estabilidade de tensão para análise de segurança em tempo real. Campinas, SP: UNICAMP.
- ALMEIDA, S. &. (2005). Definição e análise de contingências severas na Rede Eléctrica Portuguesa. *9º Congresso Hispano-Luso de Engenharia Electrotécnica* (pp. 1-9). Marbella, Espanha: FEUP.
- ARTMANN, F. G. (2011). Otimização de Níveis de Estoque de uma Rede Varejista através do uso de Modelos Previsores, Simulação Discreta Determinística e Metaheurísticas. São Leopoldo, RS, Brasil: Dissertação de Mestrado.
- BALU, N. B. (1992). On-Line Power System Security Analysis. *Proceedings of IEEE*, 262-280.
- BATTITI, R. T. (1994). The reactive tabu search. *ORSA Journal on Computing* 6, 126–140.
- BOUSSAID, I. L. (2013). A Survey on Optimization Metaheuristics. *Information Sciences*, 237-240.
- CANTO dos SANTOS, J. V., & GARCIA, A. V. (1998). Tratamiento de contingencias que causan desconexiones em sistemas electricos de Potencia. *Información Tecnológica (Impresa) La Serena - Chile*, 205-210.
- CARPENTIER, J. (1993). STATIC SECURITY ASSESSMENT AND CONTROL : A SHORT SURVEY. : "Planning, Operation and Control of Today's Electric Power Systems". *IEFE/NTUA Athens Power Tech Conference* (pp. 1-9). Atenas, Grécia: IEEE.
- CERNY, V. (1985). Thermodynamical approach to the traveling salesman problem: an efficient simulation algorithm. *Journal of Optimization Theory and Applications* 45, 41–51.
- CHARON, I. H. (2002). The noising methods. *Essays and Surveys in Metaheuristics* (pp. 245–261). Hansen, C.C: Kluwer Academic Publishers.
- CHEN, S. (2004). Open Design of Networked Power Quality Monitoring Systems. *IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT*, 597-601.
- CHEN, Y., & BOSE, A. (1989). Direct Ranking for Voltage Contingency Selection. *IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 4, No. 4,* 1335-1344.
- CHIEN, S. E., CHENG, I.-T., CHOU, Y., & LIU, C. W. (2007). Automation of Contingency Analysis for Special Protection Systems in Taiwan Power System. *International Conference on Intelligent Systems Applications to Power Systems* (pp. Shih-En Chien, I-Ta Cheng, Yi-Ting Chou and Chih-Wen Liu). Niigata, Japão: IEEE.
- COLLINS, N. E. (1988). Simulated annealing –an annotated bibliography. *American Journal of Mathematical and Management Sciences* 8 (pp. 209–307). Philadelphia: USA.
- CONNELLY, D. T. (1992). General Purpose Simulated Annealing. *Journal of Operations Reseach* vol. 43, 495-505.
- DEVARAJ, D. Y. (2002). Radial basis function networks for fast contingency ranking. *Electrical Power and Energy Systems*, 387-395.
- DY LIACCO, T. E. (1967). The Adaptive Reliability Control System. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems.*, 517-531.
- EJEBE, G. C. (1979). Automatic contingency selection. . *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 97-103.
- EWART, D. N. (1971). Automation and utility system security. *IEEE Spectrum*, 37-42.
- 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.

- FLEISCHER, M. (1995). Simulated annealing: past, present and future. *Proceedings of the 27th Conference on Winter Simulation* (pp. 155–161). Arlington, VA: USA.
- FRANCISCO, G. D. (2005). Avaliação de Ferramentas de Análise de Estabilidade de Tensão. *Dissertação de Mestrado*. Itajubá, MG, BR: UNIFEI.
- FRERIS, L. S. (1968). Investigation of the Load Flow Problem,. *IEEE, vol 115, n 10*, 1459-1470.
- GERHARDT, R. A. (2007). Um Sistema Computacional para Análise de Segurança em Sistemas de Energia Elétrica. *Dissertação de Mestrado*. S. Leopoldo, RS, BR: UNISINOS.
- GLOVER, F., & KOCHENBERGER, G. A. (2003). Handbook of Metaheuristics. *Kluwer Academic Publishers, Boston*.
- GUERRA, A. F. (2002). Seleção de contingências para violações de MW em ramos de sistemas elétricos de potência utilizando abordagem multinível adaptativa. *SBPO* (pp. 10-13). Campinas, SP: UNICAMP.
- JOHNSON, D. E. (1990). *Fundamentos de análise de circuitos elétricos*. New Jersey: Prentice Hall.
- KIRKPATRIK, GELATT, S., & VECCHI, M. (1983). Optimization by simulated annealing. *Science* 220, 671–680.
- KUMAR, A. R. (2011). Contingency Analysis in Power System. *Engenering Master Degree*. Patiala, India: Thapar University.
- LUKE, S. (2009). *Essentials of Metaheuristics*. Disponível em. Fonte: Department of Computer Science: <http://cs.gmu.edu/~sean/book/>
- MENG, Z. J., XUE, Y., & LO, K. L. (2006). A New Approximate Load Flow Calculation Method for Contingency Selection. *Power Systems Conference and Exposition Atlanta* (pp. 1601-1605). Georgia: IEEE.
- MENG, Z. J., XUE, Y., & LO, K. L. (2009). An Approximate Load Flow Calculation Method for the Contingency Selection of Double Transmission Line Outage. *The International Conference on Electrical Engineering*. Shenyang, China.
- MONTICELLI, A. (1983). *Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica*. São Paulo: Edgard Blüche.
- MONTICELLI, A., Santos, A., Pereira, M. V., Cunha, S. H., Parker, B. J., & Praça, J. C. (1982). Interactive transmission network planning using a least-effort criterion, ., vol. PAS-101,. *IEEE Trans. Power Appar. Syst., vol. PAS-101,,* 3919-3925.
- MOUSTAFA, M. M. (2014). Tuning a digital multivariable controller for a lab-scale helicopter system via simulated annealing and evolutionary algorithms. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 34-49.
- NELDER, J. M. (1965). A simplex method for function minimization,. *The Computer Journal* 7, 308–313.
- NEMHAUSER, G. L., & WOLSEY, L. A. (1999). Integer and combinatorial optimization. . *John Wiley & Sons*. New York.
- PAPADIMITRIOU, C. H., & STEIGLITZ, K. (1998). *Combinatorial optimization: algorithms and complexity*. Mineola, NY: Dover.
- QUINTELA, A. (2002). Estudo de índices de proximidade ao limite de estabilidade de tensão e aplicação na seleção de contingências. *Dissertação de Mestrado*. Campinas, S: UNICAMP.
- RUTENBAR R. A., J. R. (1987). Floorplanning by Annealing on a Hypercube Multiprocessor. *Proc. IEEE Intl. Conf. on CAD*, 346-349.
- RUTENBAR, R. A. (1992). Simulated Annealing Algorithms An Overview. *IEEE Circuits and Devices Magazine*, 99-109.
- SRIVANI, J. &. (2008). Power system static security assessment and evaluation using external system equivalents. *Electrical Power and Energy Systems*, 83-92.
- STOTT, B., & ALSAC, O. (1973). Fast Decoupled Load Flow. *IEEE PES Summer Meeting & EHV/UHV Conference* (pp. 859-868). Vancouver, B.C. Canada: IEEE.
- SUDERSAN, A., ABDELRAHMAN, M., & 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* (pp. 556-560). Atlanta, Georgia: IEEE.
- TINNEY, W. F., & HART, C. E. (1967). Power Flow Solution by Newton's Method. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1449-1460.

TOMSOVIC, K. (2005). Designing the Next Generation of Real-Time Control, Communication, and Computations for Large Power Systems. *PROCEEDINGS OF THE IEEE. Vol 93*, 965-979.

## APÊNDICE A

Dados de execução da rede IEEE 30:

1	2	BARRA UM	1060	0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
2	1	BARRA DOIS	1045	0	40.0	.0	-40.0	50.0	21.7	12.7	.0	.0
3	0	BARRA TRES	1000	0	.0	.0	.0	.0	2.4	1.2	.0	.0
4	0	BARRA QUATRO	1000	0	.0	.0	.0	.0	7.6	1.6	.0	.0
5	1	BARRA CINCO	1010	0	.0	.0	-40.0	40.0	94.2	19.0	.0	.0
6	0	BARRA SEIS	1000	0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
7	0	BARRA SETE	1000	0	.0	.0	.0	.0	22.8	10.9	.0	.0
8	1	BARRA OITO	1010	0	.0	.0	-10.0	40.0	30.0	30.0	.0	.0
9	0	BARRA NOVE	1000	0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
10	0	BARRA DEZ	1000	0	.0	.0	.0	.0	5.8	2.0	19.0	.0
11	1	BARRA ONZE	1082	0	.0	.0	-6.0	24.0	.0	.0	.0	.0
12	0	BARRA DOZE	1000	0	.0	.0	.0	.0	11.2	7.5	.0	.0
13	1	BARRA TREZE	1071	0	.0	.0	-6.0	24.0	.0	.0	.0	.0
14	0	BARRA QATRZE	1000	0	.0	.0	.0	.0	6.2	1.6	.0	.0
15	0	BARRA QUINZE	1000	0	.0	.0	.0	.0	8.2	2.5	.0	.0
16	0	BARRA DZSSIS	1000	0	.0	.0	.0	.0	3.5	1.8	.0	.0
17	0	BARRA DZSETE	1000	0	.0	.0	.0	.0	9.0	5.8	.0	.0
18	0	BARRA DZOITO	1000	0	.0	.0	.0	.0	3.2	.9	.0	.0
19	0	BARRA DZNOVE	1000	0	.0	.0	.0	.0	9.5	3.4	.0	.0
20	0	BARRA VINTE	1000	0	.0	.0	.0	.0	2.2	.7	.0	.0
21	0	BARRA V. UM	1000	0	.0	.0	.0	.0	17.5	11.2	.0	.0
22	0	BARRA V.DOIS	1000	0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
23	0	BARRA V.TRES	1000	0	.0	.0	.0	.0	3.2	1.6	.0	.0
24	0	BARRA V.QUAT	1000	0	.0	.0	.0	.0	8.7	6.7	4.3	.0
25	0	BARRA V.CINC	1000	0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
26	0	BARRA V.SEIS	1000	0	.0	.0	.0	.0	3.5	2.3	.0	.0
27	0	BARRA V.SETE	1000	0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
28	0	BARRA V.OITO	1000	0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
29	0	BARRA V.NOVE	1000	0	.0	.0	.0	.0	2.4	.9	.0	.0
30	0	BARRA TRINTA	1000	0	.0	.0	.0	.0	10.6	1.9	.0	.0
9999												
1	2	192	575	5280	130							
1	3	452	1852	4080	130							
2	4	570	1737	3680	65							
3	4	132	379	840	130							
2	5	472	1983	4180	130							
2	6	581	1763	3740	65							
4	6	119	414	900	90							
5	7	460	1160	2040	70							
6	7	267	820	1700	130							
6	8	120	420	900	32							
6	9	0	2080	0	978	65						
6	10	0	5560	0	969	32						
9	11	0	2080	0	65							
9	10	0	1100	0	65							
4	12	0	2560	0	932	65						
12	13	0	1400	0	65							
12	14	1231	2559	0	32							
12	15	662	1304	0	32							
12	16	945	1987	0	32							
14	15	2210	1997	0	16							
16	17	824	1923	0	16							
15	18	1070	2185	0	16							
18	19	639	1292	0	16							
19	20	340	680	0	32							
10	20	936	2090	0	32							
10	17	324	845	0	32							
10	21	348	749	0	32							
10	22	727	1499	0	32							

21	22	116	236	0	32	
15	23	1000	2020	0	16	
22	24	1150	1790	0	16	
23	24	1320	2700	0	16	
24	25	1885	3292	0	16	
25	26	2544	3800	0	16	
25	27	1093	2087	0	65	
27	28	0	3960	0	16	
27	29	2198	4153	0	16	
27	30	3202	6027	0	16	
29	30	2399	4533	0	32	
8	28	636	2000	4280		32
6	28	169	599	1300	32	

9999

**APÊNDICE B**

O artigo referente a este trabalho foi submetido para apresentação no simpósio XLVIII SBPO, e foi aceito para apresentação. Segue o artigo aceito.

## 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@unisin.br](mailto:jvcanto@unisin.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 trazerem 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.

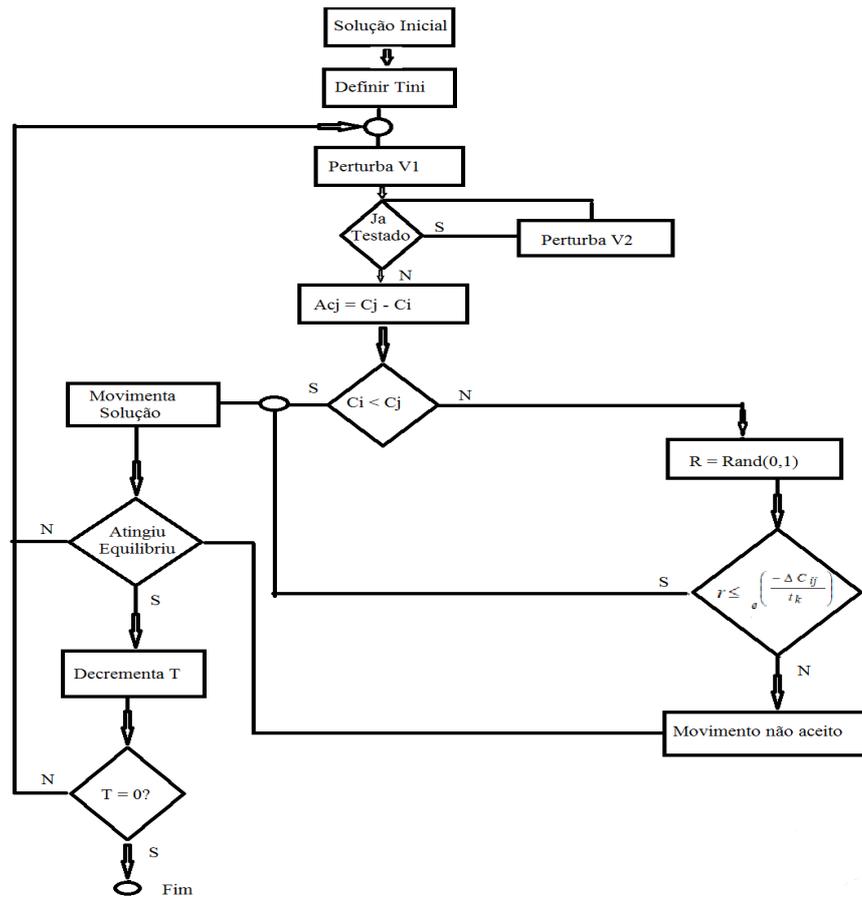


Figura 1: Aplicação de *Simulated Annealing* para Análise de Segurança

#### 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 formula 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<sup>®</sup> desenvolvido pelo CEPEL. 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 Elétrica

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. /, 32:5-44.