

ALGORITMOS GENÉTICOS PARA SELEÇÃO DE CONTINGÊNCIAS NA ANÁLISE DE SEGURANÇA ESTÁTICA DE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA

Iverson Costa, José V. Canto dos Santos, Arthur T. Gómez
PIPCA - UNISINOS
Av. Unisinos, 950, 93022-000, São Leopoldo - RS
iverson.c@gmail.com, jvcanto@unisinos.br, breno@unisinos.br

RESUMO

A importância de um suprimento confiável de energia elétrica, na sociedade industrial, é inquestionável. Em centros de controle de redes elétricas, uma importante tarefa é a Análise de Segurança. Nesta tarefa, uma contingência é a saída de operação de um ou mais equipamentos, enquanto que seleção de contingências é a determinação das contingências mais severas existentes no sistema. Apesar dos avanços tecnológicos atuais, uma análise de todas as contingências possíveis é impraticável. Neste trabalho, um método é apresentado para realizar, eficientemente, a seleção de contingências múltiplas. O problema é modelado como um problema de otimização combinatória, e resolvido através de algoritmos genéticos. Um método robusto, que considera aspectos de fluxo de potência e tensão, é apresentado e testado na rede IEEE30 e em um sistema real de grande porte, considerando saídas duplas de linha. Os resultados demonstram uma acurácia próxima a 100%, quando comparados a um método exato.

PALAVRAS CHAVE. Análise de Segurança, Seleção de Contingências, Algoritmos Genéticos.

Área principal: EN - PO na Área de Energia

ABSTRACT

The importance of a reliable supply of electricity, to the industrial society, is unquestionable. In control centers of electrical utilities, an important computational task is the Security Analysis. In this task, contingency is the out of operation of one or more devices, and contingencies selection is the determination of the most severe contingencies for the system. Despite the current technological advances, an analysis of all possible contingencies, for a real grid, is impracticable. In this work, a method to efficiently perform the selection of multiple contingencies is presented. The problem is modeled as a combinatorial optimization problem, and solved by two genetic algorithms. A robust method, which considers aspects of power flow and voltage, is presented and tested over the IEEE30 test system and over a large real network, considering double outages of branches. The results presented, shows accuracy close to 100%, when compared with an exact method.

KEYWORDS. Security Analysis, Contingency Selection, Genetic Algorithms.

Main area : EN – OR in Energy

1. Introdução

A energia elétrica é um importante bem para sociedade, compondo indicadores de desenvolvimento social e econômico. A qualidade e a continuidade do fornecimento da Energia Elétrica são, portanto, imprescindíveis para nosso modo de vida atual.

Neste contexto, a Análise de Segurança em Sistemas Elétricos de Potência (AS) adquire grande importância. As principais incumbências desta disciplina são:

- a) Identificar o estado de operação atual da rede (seguro, corretivamente seguro, alerta, emergência corrigível, emergência não corrigível e restaurativo);
- b) Identificar as possíveis evoluções do estado atual de operação, em um curto espaço de tempo (STOTT, 1987).

Na AS, uma contingência é a saída de operação de um ou mais equipamentos. Linhas de transmissão, geradores, e transformadores, são exemplos de equipamentos (BALU, 1992).

A Análise de Contingências é uma importante etapa da Análise de Segurança. Ela consiste em identificar, em uma lista de contingências possíveis, quais delas, em caso de ocorrência, levariam a rede a um estado de operação não seguro (SRIVANI, 2008). Existem, na operação das redes elétricas, severas restrições de tempo impostas a tarefa de Análise de Contingências. Para resolver este problema, diversos métodos foram utilizados nas últimas décadas (CHAKRABARTI, 2008), (CHEN, 1989), (DEVARAJ, 2002), (EJEBE, 1979), (GALIANA, 1984), (GUERRA, 2002), (NIMS, 1997), (SUDERSAN, 2004), (ZABORSKY, 1980). Alguns destes métodos visam realizar a Análise de Contingências, enquanto que outros são utilizados na etapa de Seleção de Contingências.

A Seleção de Contingências é uma etapa anterior à Análise de Contingências. Sua função é eliminar, da lista de contingências a serem avaliadas, aquelas que não são graves (GUERRA, 2002). Um método robusto para a Seleção de Contingências deve ser capaz de eliminar da lista de contingências, de forma eficiente, a maior quantidade possível de casos não graves. Além disso, um bom método de Seleção de Contingências deve manter, na lista de contingências, os casos graves.

Neste trabalho, o problema da Seleção de Contingências é abordado como um problema de otimização combinatória, e resolvido através de dois Algoritmos Genéticos (AG). A principal contribuição deste trabalho é a apresentação de um método robusto e eficiente para a Seleção de Contingências múltiplas. Entre as características desejáveis do método, estão:

- a) Seleção de contingências múltiplas;
- b) Seleção de contingências sob os aspectos de violações de fluxo de potência ativa nas linhas e violações de tensão nas barras;
- c) Acurácia da seleção próxima a 100%, mesmo avaliando poucos casos;
- d) Ausência de cálculos *off-line* e facilidade para lidar com mudanças topológicas.

As próximas seções estão estruturadas da seguinte forma: A seção 2 apresenta os conceitos necessários à compreensão do artigo, através de uma breve revisão bibliográfica. Na seção 3, são detalhados os aspectos relativos à implementação do método proposto. A seção 4, por sua vez, contém informações relativas à metodologia da condução dos experimentos. Na seção 5, os resultados são apresentados. A seção 6, por fim, descreve as conclusões do trabalho.

2. Conceitos básicos

2.1 Análise de Segurança

Os Sistemas Elétricos de Potência são estruturas montadas para gerar e distribuir energia elétrica. Eles são compostos por grandes redes complexas e fortemente conexas de equipamentos. Nessas redes, os geradores operam de forma síncrona, em um equilíbrio dinâmico, adaptando a geração de energia às cargas existentes. O controle da operação das redes elétricas ocorre nos centros de controle, que são estruturas onde engenheiros observam e controlam um sistema elétrico, para manter a estabilidade e a segurança do sistema (TOMSOVIC, 2005).

Uma importante tarefa realizada nos centros de controle é a Análise de Segurança (AS).

Esta tarefa envolve a avaliação de dados da rede para estimar seu estado de operação atual, bem como as possíveis evoluções desse estado (BALU, 1992). A importância da AS deriva do contexto atual, que contempla:

- a) A relevância da energia elétrica para a sociedade atual;
- b) O crescimento da demanda energética e a reestruturação do setor elétrico;
- c) Investimentos insuficientes no sistema, que levam a operação perto dos seus limites (KABOURIS, 2000).

A AS divide-se em Análise Dinâmica e Análise Estática. Este trabalho está inserido no contexto da Análise Estática (AE), que considera os sistemas de potência em equilíbrio quanto à geração e atendimento das cargas. Transições de potência ativa e magnitudes de tensão são desconsideradas na AE. Essa simplificação a torna eficiente, e, por isso, particularmente importante para a Análise de Contingências durante a operação (CARPENTIER, 1993).

2.2 Análise de Contingências

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

A Análise de Contingências é uma tarefa que tem por objetivo saber, dentre as contingências possíveis, quais levariam a rede a um estado de operação não seguro (CARPENTIER, 1993). Esta tarefa deve ser executada em intervalos regulares, e geralmente curtos, de tempo. Apesar do aumento do poder computacional ocorrido nas últimas décadas, uma análise exaustiva de todas as contingências possíveis, durante a operação, é impraticável. O tamanho e as características das redes elétricas atuais, bem como severas restrições de tempo impostas à tarefa de Análise de Contingências, tornam o problema de difícil tratamento computacional (GUERRA, 2002). A tabela 1 ilustra a evolução do tamanho do problema para a rede real de 810 barras estudada neste trabalho:

Ordem da contingência	Contingências possíveis
1 ramo (Simples)	1340
2 ramos (Dupla)	897.130
3 ramos (Tripla)	400.119.980

Tabela 1: Total de contingências possíveis na rede real de 810 barras

A tabela 1 mostra a inviabilidade de uma análise exaustiva de todas as contingências de ramo possíveis, principalmente quando há necessidade de avaliar contingências múltiplas em redes reais de grande porte. Para resolver este problema, diversos métodos foram desenvolvidos nas últimas décadas. Entre os trabalhos publicados, destaca-se a classificação direta (EJEBE, 1979), os Índices de Performance (CHEN, 1989), as abordagens topológicas (ZABORSKY, 1980), (GALIANA, 1984), os métodos híbridos e meta-heurísticas, (NIMS, 1997), (GUERRA, 2002), (SUDERSAN, 2004), e as redes neurais artificiais (DEVARAJ, 2002), (CHAKRABARTI, 2008).

Métodos de classificação direta geram mascaramentos e falsos alarmes (contingências não graves classificadas como graves) (IRISSARI, 1979). Esses problemas foram corrigidos em trabalhos mais recentes, porém não para a seleção de contingências múltiplas (CARPENTIER, 1993). Métodos baseados em redes neurais mostraram-se eficazes, porém necessitam de uma etapa anterior de treinamento da rede (DEVARAJ, 2002), e por isso podem ser sensíveis a alterações topológicas (CHAKRABARTI, 2008), o que não ocorre nos métodos de meta-heurísticas estudados. Os métodos baseados em meta-heurísticas encontraram bons resultados para redes de teste, porém sua utilização não foi estudada em redes de tamanho real (SAITOH,

1996), (NIMS, 1997), (SUDERSAN, 2004). As abordagens topológicas, por sua vez, reduzem os nodos calculados aos nodos afetados pelas contingências, tornando a seleção mais eficiente sem a necessidade de cálculos *off-line* (CARPENTIER, 1993). Embora as abordagens topológicas tornem os cálculos mais eficientes, uma execução para todas as contingências possíveis ainda é proibitiva em termos de tempo.

A Seleção de Contingências é uma etapa anterior a Análise de Contingências, que visa reduzir a lista de contingências a ser avaliada na Análise de Contingências, ganhando assim, eficiência (GUERRA, 2002). Dentre os métodos utilizados na Seleção de Contingências, destaca-se a triagem. A triagem (ou *screening*) é um método baseado em soluções de um Fluxo de Potência (CARPENTIER, 1993). Os métodos de triagem são eficazes, porém a necessidade de um cálculo do Fluxo de Potência os torna menos eficientes sob o ponto de vista computacional (MELIOPOULOS, 1994). Para resolver isso, é possível utilizar métodos mais eficientes para o cálculo do Fluxo de Potência, como o Fluxo de Potência Desacoplado Rápido (STOTT, 1973).

2.3 Fluxo de Potência Desacoplado Rápido

O Fluxo de Potência Desacoplado Rápido (FCDR) 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 calcular o Fluxo de Potência. Essas características o tornam factível para o cálculo de contingências *on-line* em redes elétricas (STOTT, 1973). A solução de um FCDR é bem aceita como base para cálculos de Índices de Performance (ALBUQUERQUE, 2005).

2.4 Índices 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 (ALBUQUERQUE, 2005). 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, para evitar mascaramentos. Mascaramentos ocorrem quando um Índice de Performance considera mais graves contingências que causam algumas pequenas violações, do que contingências causem grandes sobrecargas. Essa característica pode levar o algoritmo a ignorar contingências graves em detrimento de contingências menos graves (MELIOPOULOS, 1994).

2.5 Algoritmos Genéticos

Um Algoritmo Genético (AG) é um procedimento de busca geral desenvolvido por John Holland em 1975 (HOLLAND, 1992). Seu funcionamento é baseado em como ocorre a evolução da vida, através dos princípios da genética, em populações de indivíduos. Na natureza, indivíduos mais aptos sobrevivem no meio e reproduzem-se através de um mecanismo de seleção natural. De forma análoga, os AG evoluem um conjunto de soluções codificadas para um determinado problema, com vistas a encontrar boas soluções (QUINTELA, 2002).

Nos AG, cada solução é codificada em um cromossomo. Geralmente, os cromossomos são números binários que representam as variáveis de decisão do problema. O algoritmo inicia gerando e avaliando uma população aleatória de indivíduos (ou cromossomos). O indivíduo é avaliado por uma função de aptidão, que reflete a qualidade da solução representada pelo indivíduo. Uma nova geração de indivíduos é obtida através da seleção e reprodução dos indivíduos da população atual. O processo se repete até que um critério de parada seja atingido. A medida que a população evolui, soluções melhores são encontradas. Para que isso ocorra, a seleção e a reprodução são implementadas de forma que indivíduos mais aptos tenham mais chance de seleção e reprodução (PHAM, 2000).

A reprodução ocorre através de cruzamentos e mutações. O cruzamento entre dois indivíduos gera descendentes que contém características dos pais. A mutação, por sua vez, altera um ou mais *bits* do cromossomo do indivíduo. (PHAM, 2000).

A figura 1 ilustra o algoritmo básico de um AG:



Figura 1: Algoritmo básico de um AG. Adaptado de (PHAM, 2000).

Uma característica desejável dos AG é a capacidade desta metaheurística de encontrar boas soluções para problemas de otimização a partir da varredura de pequenas porções do espaço de busca (NIMS, 1997).

3. AGFI e AGTn

Este trabalho apresenta dois AG: O Algoritmo Genético para Seleção de Contingências por critério de Violações de Fluxo de Potência Ativa nas linhas (AGFI), e o Algoritmo Genético para Seleção de Contingências por Critério de Violação de Tensão nas Barras (AGTn).

Os dois AG operam da mesma maneira, exceto por suas funções de aptidão. AGFI utiliza uma função de aptidão que leva em consideração violações de fluxo de potência ativa nas linhas, enquanto AGTn utiliza uma função de aptidão baseada em violações de tensão nas barras. AGFI e AGTn implementam, em adição ao AG clássico, os seguintes componentes e operadores:

- Estrutura de reaproveitamento de cálculos;
- Seleção por posicionamento linear com reserva de probabilidade;
- Elitismo;
- Epidemia, Busca local, e Supressão do espaço de busca.

A figura 2 ilustra o algoritmo utilizado por AGFI e AGTn:

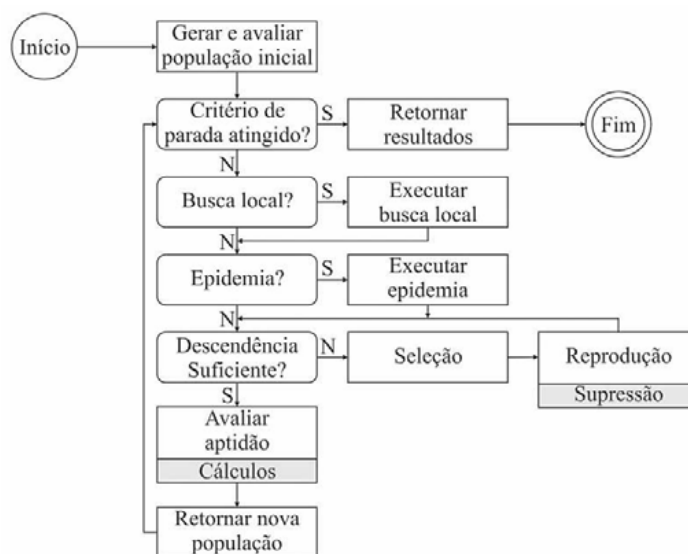


Figura 2: Estrutura interna de AGFI e AGTn

3.1 Codificação

Cada indivíduo em AGFI e AGTn representa uma contingência possível. Inicialmente, uma tabela de ramos atribui um código binário para cada ramo da rede. Os cromossomos são compostos pelos códigos dos ramos contingenciados. No caso de contingências múltiplas, o cromossomo é formado pela justaposição binária dos códigos dos ramos contingenciados. Podem ser formadas contingências de qualquer ordem, dentro do limite de 64 bits. Em uma rede com 1340 ramos, são necessários 11 bits para codificar um ramo. Neste caso, é possível a seleção de contingências de até 5 ramos. AGFI e AGTn trabalham apenas com contingências de uma mesma ordem em cada rodada. A figura 3 ilustra a formação de cromossomos para uma contingência simples e para uma contingência dupla:

Tabela de ramos				Codificação dos cromossomos	
Ramo	Código	Ramo	Código	Contingência simples	Contingência dupla
ramo a	000	ramo e	100		
ramo b	001	-	101		
ramo c	010	-	110		
ramo d	011	-	111		

Figura 3: Codificação dos cromossomos

Como o número de ramos em uma rede nem sempre é uma potência exata de dois, há códigos da tabela de ramos que não possuem ramo correspondente. Cromossomos formados por esses códigos são sumariamente descartados pelos operadores. Outra característica dessa forma de codificação, é que a saída de k ramos tenha $k!$ possíveis representações binárias. Isto é aceito na busca, pois permite que qualquer codificação seja atingida pelos operadores de reprodução.

3.2 Funções de Aptidão

Para avaliar a gravidade da contingência representada pelo cromossomo, um Fluxo de Carga Desacoplado Rápido (FCDR) é executado, e Índices de Performance associados aos AG são calculados.

AGFI utiliza o Índice Genético de Severidade de Fluxo (ISGFI), que é baseado no índice ISFI, do software ANAREDE®. Enquanto ISFI utiliza valores de potência aparente em seu cômputo, ISGFI utiliza valores de fluxo de potência ativa. ISGFI é obtido através da fórmula (1):

$$ISGFI = \sum_{l=1}^v \frac{pmw(l)^2}{cmw(l)^2}; \quad (1)$$

onde:

$pmw(l)$: maior fluxo de potência ativa do ramo l ;

$cmw(l)$: capacidade do ramo l , em MW;

v : número de ramos com sobrecarga;

l : índice do ramo sobrecarregado.

O AGTn, por sua vez, utiliza o Índice de Monitoração de Tensão (ISv), que é o mesmo utilizado pelo ANAREDE®. O ISv é obtido através da fórmula (3) (CEPEL, 2004):

$$VIOLt = \begin{cases} V(b) - V_{max}, & \text{se } V(b) > V_{max}; \\ V_{min} - V(b), & \text{se } V(b) < V_{min}; \end{cases} \quad (2)$$

$$ISv = \sum_{b=1}^n (VIOLt(b))^2 \times 10^4 \quad (3)$$

onde:

$VIOLt(b)$: violação de tensão na barra b ;

$V(b)$: tensão na barra b (em p. u.);

V_{max} : tensão máxima permitida na barra b (em p. u.);

V_{min} : tensão mínima permitida na barra b (em p. u.);

n : número de barras com sobre-tensão ou sub-tensão;

ISv: Índice de Monitoração de Tensão;
l: índice da barra com sobretensão ou subtensão.

Para a execução do AGTn, V_{\min} foi estipulado em 0,95 p. u. (*per unit*), enquanto que V_{\max} foi estipulado em 1,05 p. u..

Para evitar o recálculo do FCDR, quando um índice é demandado, o outro índice também é calculado. Os resultados são armazenados em uma estrutura de memória, para tornar a busca mais eficiente. A estrutura de reaproveitamento de cálculos suporta, nesta versão, contingências simples e duplas.

Como os Índices de Performance demandam o cálculo de um Fluxo de Potência, existe a possibilidade da não convergência do cálculo. Casos de não convergência e desconexão são salvos em uma lista e retornados ao final do algoritmo, para tratamento por outros métodos.

3.3 Seleção, cruzamento e mutação

O operador de seleção escolhido foi o de seleção por posicionamento linear. Neste operador de seleção, os indivíduos são ordenados conforme seu valor de aptidão. A seguir, a probabilidade de seleção de um indivíduo é atribuída de acordo com sua posição nesta lista ordenada (PHAM, 2000). Porém, o operador clássico foi alterado para introduzir uma reserva de probabilidade igualmente dividida. Através desta reserva, um percentual da probabilidade de seleção é igualmente dividido entre todos os indivíduos. O restante da probabilidade é atribuído aos indivíduos de acordo com sua posição na lista, conforme o posicionamento linear clássico. Esta abordagem tem por objetivo reduzir a chance de seleção dos indivíduos mais aptos e aumentar a chance de seleção dos indivíduos menos aptos, para reduzir o efeito da pressão seletiva e manter a diversidade populacional ao longo da busca.

Para o cruzamento, foram utilizados dois operadores: O cruzamento por pontos múltiplos e o cruzamento por troca de ramos. No cruzamento por pontos múltiplos, dois ou mais pontos de corte são escolhidos de forma aleatória, e a descendência é gerada a partir da alternância das partes dos cromossomos pais. Um cruzamento por troca de ramos, por sua vez, pode ser entendido como um cruzamento de pontos múltiplos onde os pontos de corte são os *bits* que separam os ramos dentro do cromossomo. Este cruzamento foi desenvolvido para o problema, e força a troca de ramos entre duas contingências. A figura 4 ilustra os dois tipos de cruzamento:

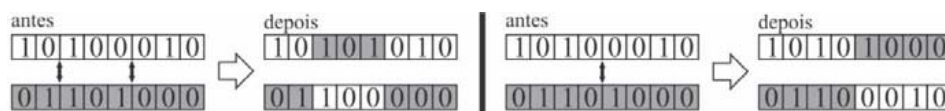


Figura 4: Cruzamento de pontos múltiplos e Cruzamento por troca de ramos

A mutação utilizada realiza a inversão de 1 *bit* do cromossomo. A posição do *bit* a ser invertido é escolhida aleatoriamente. A probabilidade de escolha é igual para todas as posições do cromossomo. A taxa de mutação permanece fixa durante a busca, exceto quando o AG encontra dificuldades em gerar a próxima população. Isso pode ocorrer quando o AG converge e há baixa diversidade na população, pois AGFI e AGTn não aceitam cromossomos duplicados em suas populações. Caso haja dificuldade em gerar a próxima população, a taxa de mutação é incrementada em 0,01, até que a próxima população seja gerada. Após gerar a próxima população, a taxa de cruzamento volta ao valor parametrizado.

3.4 Elitismo

Ao fim de uma geração, os melhores indivíduos da geração anterior são conduzidos, de forma automática, para a próxima geração. A quantidade de indivíduos conduzidos para a próxima geração é definida por um parâmetro (PHAM, 2000).

3.5 Epidemia, Busca local e Supressão do espaço de buscas

Como critério de execução da epidemia, foi utilizado um número máximo de gerações sem encontrar um indivíduo mais apto. Atingido esse limite, toda a população é descartada, e

uma nova população é criada aleatoriamente (MEDEIROS, 2002). As boas soluções encontradas são retornadas ao fim do algoritmo, pois foram salvas, ao fim de cada geração, na lista de retorno.

Na busca local, são realizados cruzamentos por troca de ramos entre os indivíduos da população elite, até que seja gerada uma determinada quantidade de indivíduos. A ordem dos cruzamentos obedece ao produto cartesiano entre dois conjuntos contendo os indivíduos da população elite. Os novos indivíduos são obtidos e ordenados por seus valores de aptidão. Em seguida, os mais aptos são inseridos na população da próxima geração. A busca local ocorre em um intervalo de gerações parametrizado. Também são parâmetros a quantidade de indivíduos gerados, e a quantidade dos melhores, entre os gerados, que serão aproveitados para a próxima geração.

A Supressão do espaço de busca ocorre quando um ramo ocupa grande parte da população elite durante um determinado número de gerações. Quanto isto ocorre, ele é adicionado a uma lista de ramos proibidos. Este mecanismo visa evitar uma intensificação excessiva da busca. Cromossomos que contenham ramos que estão na lista de ramos proibidos, são sumariamente descartados pelos operadores. O descarte dos cromossomos contaminados ocorrerá durante um número de gerações. Após o término do período de supressão, o ramo é removido da lista, e pode ser utilizado novamente.

4. Metodologia de condução dos experimentos

Os experimentos realizados avaliam os aspectos de eficácia e eficiência do método proposto. Os dois aspectos são avaliados para contingências duplas de ramo, tanto na rede IEEE30, como na rede real de 810 barras e 1340 ramos. A eficácia do método é avaliada pela taxa média de captura, enquanto que a eficiência é avaliada, tanto pelo percentual de varredura do espaço de busca, quanto pelo tempo médio de execução.

4.1 Taxa de captura

A taxa de captura é um escalar que mede o quanto um método de seleção é efetivo em retornar as contingências mais graves. Ele compara a lista de contingências mais graves retornada pelo método avaliado com a lista de contingências mais graves retornada pelo método exaustivo, que testa todas as contingências possíveis (ALBUQUERQUE, 2005), (QUINTELA, 2002).

A formulação da taxa de captura é apresentada pela equação (4):

$$tcr = \frac{K(p)}{N} \times 100; \quad (4)$$

onde:

tcr: taxa de captura;

N: quantidade de contingências graves que desejamos capturar;

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

K(p): contingências sabidamente graves que estão nas *p* posições iniciais da lista.

Na rede IEEE30, as taxas de captura foram obtidas considerando $p = N = 5$. Na rede real de 810 barras, as taxas de captura foram obtidas considerando $p = N = 10$. Para executar o método exaustivo nos 820 casos da rede IEEE30, utilizou-se o ANAREDE®. Para executar o método exaustivo nos 897.130 casos da rede real, por questões de tempo de processamento, utilizou-se o FCDR. A tabela 2 mostra as ferramentas e índices utilizados para o método exaustivo:

Rede	Aspecto	Cálculo do Fluxo de Potência	Contingências ordenadas por
IEEE30	Fluxo de Potência Ativa	Método de Newton (ANAREDE®)	ISFI (ANAREDE®)
IEEE30	Tensão	Método de Newton (ANAREDE®)	ISv (ANAREDE®)
Rede Real	Fluxo de Potência Ativa	FCDR (Fortran)	ISGFI (Fortran)
Rede Real	Tensão	FCDR (Fortran)	ISv (Fortran)

Tabela 2: Obtenção da lista ordenada de contingências segundo o método exaustivo.

4.2 Percentual de varredura do espaço de busca

O espaço de busca pode ser entendido como o conjunto de todos os valores possíveis para as variáveis de decisão de um problema (PAPADIMITRIOU, 1998). Neste trabalho, o espaço de busca é considerado o conjunto de todas as contingências duplas de ramo possíveis. O percentual de varredura do espaço de busca identifica quantas soluções, dentre as possíveis, foram testadas. Quanto menor o percentual, maior a eficiência. A quantidade de indivíduos distintos avaliados ao longo de cada geração do AG é contada, e o percentual é obtido através da equação (5):

$$peb(g) = \frac{qia(g)}{C_k^r}; \quad (5)$$

onde:

$peb(g)$: percentual do espaço de busca atingido na geração g ;
 $qia(g)$: quantidade de indivíduos distintos avaliados até a geração g ;
 C_k^r : combinações de r ramos tomados de k em k ;
 k : ordem das contingências.

4.3 Tempo de processamento

O tempo de processamento é obtido através da média e desvio padrão de 10 execuções. O Hardware utilizado contém um processador Intel® Core™ 2 Duo E7500 @ 2,93 GHz, com memória cache de 3MB e memória RAM de 3GB. O sistema operacional utilizado foi o Suse Linux. Os algoritmos foram escritos em C e Fortran, e compilados com o gcc e o gfortran.

4.4 Parâmetros dos AG

Os parâmetros dos AG foram definidos de forma empírica. A qualidade de cada parametrização testada foi aferida com base na taxa média de captura de 100 execuções. As parametrizações com as taxas médias de captura mais altas foram selecionadas para os testes.

5. Testes e resultados

AGFI e AGTn foram testados para encontrar contingências duplas de ramo em duas redes. Na rede IEEE30, existem ao todo 820 contingências duplas de ramo possíveis. Na rede real de 810 barras, por sua vez, a quantidade de contingências duplas de ramo possíveis é de 897.130.

Antes de iniciar os testes, foi rodada uma etapa de escolha dos parâmetros (seção 4.1). As melhores parametrizações encontradas, para cada algoritmo e rede, estão listadas na tabela 3:

Parâmetro	IEEE30		Rede real	
	AGFI	AGTn	AGFI	AGTn
Número de gerações	10000	100	260	9000
Tamanho da população	18	24	1000	45
Tamanho da população elite	13	2	900	9
Taxa de cruzamento	100%	70%	85%	90%
Por ponto de corte	100%	50%	100%	80%
Por troca de ramos	-	50%	-	20%
Taxa de mutação	5%	2%	1%	12%
Probabilidade de seleção igualmente dividida	36%	10%	5%	45%
Epidemia	Não	Sim	Não	Sim
Rodadas sem melhor indivíduo	-	14	-	80
Supressão	Não	Não	Não	Não
Busca local	Sim	Sim	Sim	Sim
Intervalo (em gerações)	1	5	5	40
Indivíduos gerados	5	5	4000	30
Indivíduos aproveitados	1	3	5	5

Tabela 3: Melhores parametrizações encontradas para AGFI e AGTn

Os resultados médios de AGFI e AGTn são demonstrados na tabela 4:

Resultado	Amostras	IEEE30		Rede real	
		AGFI	AGTn	AGFI	AGTn
Taxa média de captura	1000	97,43%	96,90%	99,48%	95,79%
Vezes em que o AG encontrou a contingência mais grave	1000	1000	967	949	999
Percentual médio de varredura do espaço de busca	1000	63,57%	57,55%	3,86%	6,70%
Tempo médio de execução	10	11s	10s	39m 26s	1h 9m 33s
Desvio padrão		3s	2s	1m 39s	3m 3s

Tabela 4: Resultados dos testes de AGFI e AGTn

As figuras de 5 a 8 mostram o comportamento, ao longo das gerações, de duas curvas. A primeira curva descreve a taxa média de captura, enquanto a segunda curva descreve o percentual médio de varredura do espaço de busca. Ambas são obtidas através da média de 1000 execuções, e refletem os resultados da tabela 4:

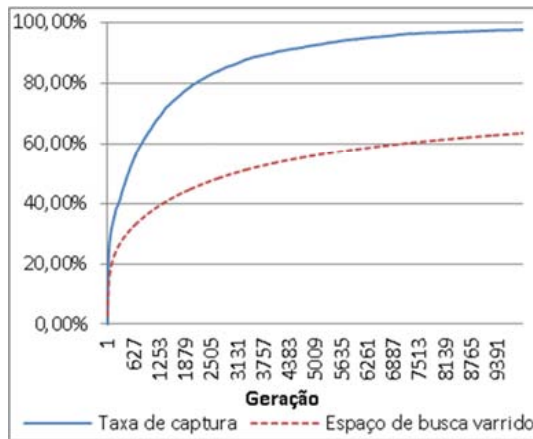


Figura 5: IEEE30 – AGFI

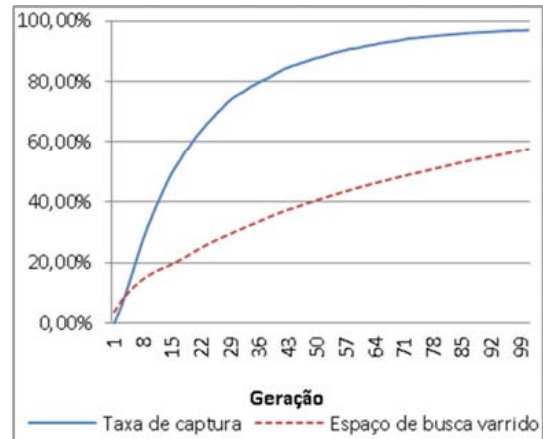


Figura 6: IEEE30 - AGTn

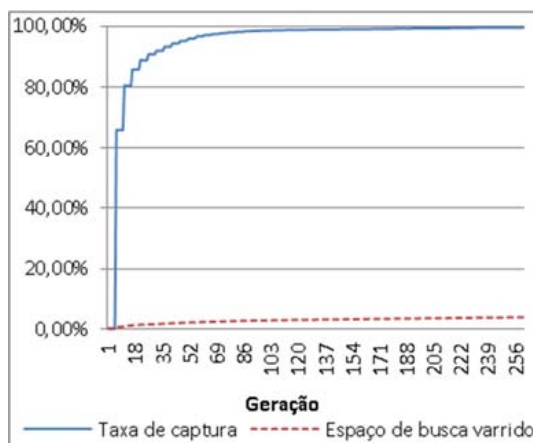


Figura 7: Rede real – AGFI

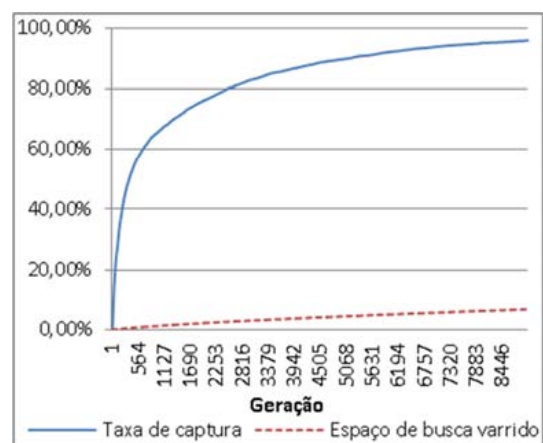


Figura 8: Rede real - AGTn

6. Conclusões e trabalhos futuros

A Energia Elétrica é muito importante para a sociedade como um todo. O bom andamento do sistema de distribuição de energia elétrica prescinde da execução correta, nos centros de controle, da Análise de Segurança.

A avaliação de todas as contingências possíveis, durante a operação de um Sistema Elétrico de Potência de grande porte, é impraticável. Dadas as severas restrições de tempo impostas a esta tarefa, diversas abordagens foram elaboradas e testadas nas últimas décadas.

Eficiência, confiabilidade, e tolerância à mudança na topologia da rede, são questões difíceis de serem encontradas em um método único.

Neste trabalho, o problema da Seleção de Contingências foi modelado como um problema de otimização, e foram utilizados dois Algoritmos Genéticos para resolver o problema. A escolha do AG foi baseada na grande capacidade desta metaheurística em varrer espaços de busca não lineares e não convexos, no intuito de localizar boas soluções para problemas de otimização. Para que os AG fossem efetivos em encontrar as contingências mais graves, empregou-se um método confiável de avaliação de quão grave uma contingência é. A literatura revisada aponta que os métodos de triagem (*screening*) evitam mascaramentos e falsos alarmes, o que os torna confiáveis. Embora eficazes, os métodos de triagem dependem do cálculo de um Fluxo de Potência, o que demanda certo esforço computacional. Para manter o compromisso entre confiabilidade e eficiência na Seleção de Contingências, o método FCDR foi escolhido para o cálculo do Fluxo de Potência.

A combinação da eficácia dos métodos de triagem com a eficiência do FCDR e dos AG foi testada na rede IEEE30 e em uma rede real de grande porte. A eficácia do método foi medida através da taxa de captura, enquanto que a eficiência do método foi medida pela varredura média do espaço de busca e pelo tempo médio de execução.

Os AGFI e AGTn mostraram-se uma ferramenta robusta para a Seleção de Contingências duplas de ramo nas redes avaliadas. Esta conclusão tem suporte nas altas taxas de captura obtidas pelos métodos, bem como no tempo necessário para a convergência dos AG, que pode ser reduzido em trabalhos futuros através de paralelização. AGFI e AGTn cumpriram o objetivo de reduzir a quantidade de contingências duplas avaliadas: Na rede real, para contingências duplas de ramo, em média, 3,86% e 6,70% das contingências possíveis foram avaliadas, obtendo taxas de captura próximas de 100%.

Embora bons resultados tenham sido obtidos, há espaço para melhorias em trabalhos futuros. Primeiramente, faz-se necessário o teste de AGFI e AGTn em outras redes reais de grande porte. Um segundo passo consiste em testar AGFI e AGTn sob variadas condições de carga. Tendo em vista que os ramos que levam a contingências graves ligam, geralmente, as mesmas barras, um estudo de uma codificação do cromossomo baseada nas barras pode levar a convergência mais rápida dos AG.

7. Referências

- Albuquerque, M. D. A.**, Seleção de contingências com relação a estabilidade de tensão para análise de segurança em tempo real, *Dissertação de mestrado*, UNICAMP, 2005.
- Almeida, S. e Pestana, R.** (2005), Definição e análise de contingências severas na Rede Eléctrica Portuguesa, *9º Congresso Hispano-Luso de Engenharia Electrotécnica*, 1-9.
- Balu, N., et al.** (1992), On-Line Power System Security Analysis. *Proceedings of IEEE, Vol.80*, 262-280.
- 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.

- Galiana, F. D.** (1984), Bound estimates of the severity of line outages in power system contingency analysis and ranking, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-103, No. 9, 2612-2624.
- 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.
- Holland, J.**, *Adaptation in Natural and Artificial System*, MIT Press, Cambridge, MA, 1992.
- Irissari, G., Sasson, A. M. e Levner, D.** (1979), Automatic contingency selection for on-line security analysis - real time tests. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol.PAS-98, No.5, 1552-1559.
- Kabouris, J., et al.** (2000), Voltage Security Considerations in an Open Power Market. *International Conference on Electrical Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies*, 278-283.
- Medeiros, F. L. L.** Algoritmo Genético Híbrido como um método de busca de estados estacionários de sistemas dinâmicos, *Dissertação de Mestrado*, INPE, 2002.
- Meliopoulos, A. P. S., Cheng, C. S. e Xia, F.** (1994), Performance Evaluation of Static Security Analysis Methods. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 9, No. 3, 1441-1449.
- Monticelli, A., Pereira, M. V. F. e Granville, S.** (1987), Security-Constrained Optimal Power Flow with Post-Contingency Corrective Rescheduling, *IEEE Transactions On Power Systems*, Vol. PWRS-2, No. 1, 175-180.
- Nims, J. W., El-keib, A. A. e Smith, R. E.** (1997), Contingency ranking for voltage stability using a genetic algorithm, *Electric Power Systems Research*, 43, 69-76.
- Papadimitriou, C. e Keneth, S.**, *Combinatorial optimization: algorithms and complexity*, Dover, Mineola, 1998.
- Pham, T., Karaboga, D.**, *Intelligent optimisation techniques: genetic algorithms, tabu search, simulated annealing and neural networks*. Springer, England, 2000.
- Quintela, A.**, Estudo de índices de proximidade ao limite de estabilidade de tensão e aplicação na seleção de contingências, *Dissertação de mestrado*, UNICAMP, 2002.
- Saitoh, H., Takano, Y. e Toyoda, J.** (1996), Genetic Algorithm-Based Method for Contingency Screening in Power Systems. *Electrical Engineering in Japan*, Vol. 116, No. 2, 99-111.
- 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.
- Zaborsky, J., Whang, K. W. e Prasad, K.** (1980), Fast Contingency Evaluation Using Concentric Relation. *IEEE Transactions on Power and Apparatus Systems*, 28-36.