



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

Iverson Farias Costa

ALGORITMO GENÉTICO PARA SELEÇÃO DE  
CONTINGÊNCIAS NA ANÁLISE ESTÁTICA DE  
SEGURANÇA EM REDES ELÉTRICAS

São Leopoldo, 2012



Iverson Farias Costa

**ALGORITMO GENÉTICO PARA SELEÇÃO DE CONTINGÊNCIAS NA  
ANÁLISE ESTÁTICA DE SEGURANÇA EM REDES ELÉTRICAS**

Dissertação apresentada como requisito parcial  
para a obtenção do título de Mestre, pelo  
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

2012

C837a Costa, Iverson Farias.

Algoritmo genético para seleção de contingências na  
análise estática de segurança em redes elétricas / Iverson  
Farias Costa. – 2012.

120 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio  
dos Sinos, Programa Interdisciplinar de Pós-Graduação em  
Computação Aplicada, 2012.

"Orientador: Dr. José Vicente Canto Dos Santos."

*Quanto mais dobro as palavras, quanto mais as malho e forjo, mais dúvidas moldo, pois os dias de intenso sol são os mais escuros: Mesmo onde haja abundante luz, tudo o que eu vir será reflexo de luz, e será mentira que inventei para esquecer que existo sem saber por que. Dedico este trabalho a todos que buscam, dia-a-dia, a luz-mentira a que chamamos de Ciência.*



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à Universidade do Vale do Rio dos Sinos por propiciar acesso aos melhores canais de informação do mundo, bem como uma bela biblioteca cercada por um campus cheio de árvores e vida.

Agradeço ao corpo docente do PIPCA por todas as valiosas e profícuas informações despendidas nas aulas e conversas de corredor.

Agradeço a meu grande orientador, o professor Dr. José Vicente Canto dos Santos, por todo o conhecimento compartilhado durante a elaboração desta dissertação. Sou muito grato por todas as horas de sua dedicação e paciência em minha orientação.

Agradeço a meus colegas Lucas Gaebrin e Carlos Weissheimer pelos bons trabalhos que fizemos juntos no início do mestrado, e pela amizade que certamente varará aos anos.

Agradeço também a meus amigos, sócios e familiares, pela compreensão quanto a minha ausência temporária, porém necessária, bem como pela ajuda por eles dispensada. Cito aqui um agradecimento especial a Robinson Barbosa pelas dicas sobre o caminho das pedras.



## RESUMO

A importância de um suprimento confiável de energia elétrica, para a sociedade industrial atual, é inquestionável. Em um centro de controle de uma rede elétrica, uma importante tarefa computacional é a Análise de Segurança. Nesta tarefa, uma contingência é saída de operação de um ou mais equipamentos, enquanto que a 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, de forma eficiente, a seleção de contingências múltiplas. O problema é modelado como um problema de otimização combinatória, e é resolvido através de dois algoritmos genéticos. Um método robusto, que considera aspectos de fluxo de potência e tensão, é apresentado e testado em uma rede IEEE e em um sistema real de grande porte, considerando saídas duplas de linha. Os resultados apresentados, obtidos através da varredura de porções reduzidas do espaço de busca, demonstram uma acurácia próxima a 100%, quando comparados a um método exato.

**Palavras-chave:** Análise de Segurança, Seleção de Contingências, Algoritmos Genéticos, Fluxo de Potência Desacoplado Rápido, Índices de Performance.



## ABSTRACT

The importance of a reliable supply of electricity to the industrial society is unquestionable. In a control center of an electrical utility, 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 an IEEE test system and a large real network, considering double outages of branches. The results presented, obtained with scans of reduced portions of search space, shows accuracy close to 100%, when compared with an exact method.

**Keywords:** Security Analysis, Contingency Selection, Genetic Algorithms, Fast Decoupled Power Flow, Performance Indexes.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Rede IEEE30.....	26
Figura 2: Estrutura básica de um AG .....	40
Figura 3: Esquema e alguns cromossomos da instância.....	41
Figura 4: Cruzamento de ponto único .....	45
Figura 5: Cruzamento de pontos múltiplos .....	46
Figura 6: Cruzamento uniforme .....	46
Figura 7: Mutação no 7º gene de um cromossomo .....	47
Figura 8: Inversão dos bits entre as posições 2 e 4.....	48
Figura 9: Estrutura interna de AGFl e AGTn.....	58
Figura 10: Representação gráfica e tabela de ramos para uma rede fictícia de 4 barras .....	59
Figura 11: Cromossomo que representa a contingência do ramo 3 na rede fictícia de 4 barras .....	60
Figura 12: Cromossomo que representa a contingência dos ramos 4 e 1 na rede fictícia de 4 barras .....	60
Figura 13: Cruzamento por troca de ramos .....	65
Figura 14: Comparação de métodos de seleção de contingências.....	71
Figura 15: Metodologia de seleção de parâmetros para ordem $k = 2$ .....	73



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Estados de operação de uma rede elétrica .....	31
Tabela 2: Valores de referência para parâmetros do AG.....	52
Tabela 3: Comparação das probabilidades de seleção com e sem reserva de probabilidade ...	64
Tabela 4: Tabela de pesos para contingências graves na rede IEEE30.....	74
Tabela 5: 5 contingências de ordem $k = 1$ mais graves segundo <i>ISfl</i> - IEEE30 .....	75
Tabela 6: 5 contingências de ordem $k = 1$ mais graves segundo <i>ISGFl</i> - IEEE30 .....	76
Tabela 7: 3 contingências de ordem $k = 1$ mais graves segundo <i>ISv</i> - IEEE30.....	76
Tabela 8: 5 contingências de ordem $k = 2$ mais graves segundo <i>ISfl</i> - IEEE30 .....	77
Tabela 9: 5 contingências de ordem $k = 2$ mais graves segundo <i>ISGFl</i> - IEEE30 .....	77
Tabela 10: 5 contingências de ordem $k = 2$ mais graves segundo <i>ISv</i> - IEEE30.....	78
Tabela 11: 5 contingências de ordem $k = 2$ mais graves segundo <i>ISGv</i> - IEEE30.....	78
Tabela 12: Coeficientes de correlação de <i>ISfl</i> com <i>ISGFl</i> e de <i>ISv</i> com <i>ISGv</i> para a rede IEEE30 .....	79
Tabela 13: Parâmetros relativos à população testados para AGFl quando $k = 1$ na rede IEEE30 .....	80
Tabela 14: Probabilidades dos operadores testadas para AGFl quando $k = 1$ na rede IEEE30 .....	80
Tabela 15: Melhor parametrização encontrada na fase 1 para AGFl quando $k = 1$ na rede IEEE30 .....	81
Tabela 16: Melhor parametrização encontrada para AGTn quando $k = 1$ na rede IEEE30 ..	83
Tabela 17: Parâmetros relativos à população testados para AGFl quando $k = 2$ na rede IEEE30 .....	85
Tabela 18: Probabilidades dos operadores testadas para AGFl quando $k = 2$ na rede IEEE30 .....	85
Tabela 19: Melhores parametrizações encontradas na fase 1 para AGFl quando $k = 2$ na rede IEEE30.....	85
Tabela 20: Parâmetros relativos à epidemia testados para AGFl quando $k = 2$ na rede IEEE30 .....	86
Tabela 21: Parâmetros relativos à supressão testados para AGFl quando $k = 2$ na rede IEEE30 .....	86
Tabela 22: Parâmetros relativos à busca local testados para AGFl quando $k = 2$ na rede IEEE30 .....	86
Tabela 23: Melhor parametrização encontrada na fase 2 para AGFl quando $k = 2$ na rede IEEE30 .....	87



Tabela 24: Melhor parametrização encontrada para AGFl quando $k = 2$ na rede IEEE30...	87
Tabela 25: Melhores parametrizações encontradas na fase 1 para AGTn quando $k = 2$ na rede IEEE30.....	89
Tabela 26: Melhor parametrização encontrada para AGTn quando $k = 2$ na rede IEEE30 .	90
Tabela 27: Resultados obtidos para o AGFl na rede IEEE30 .....	92
Tabela 28: Resultados obtidos para o AGTn na rede IEEE30 .....	92
Tabela 29: Comparação dos objetivos e aplicações dos métodos estudados à AGFl e AGTn.	94
Tabela 30: Comparação das funcionalidades e aplicações dos métodos estudados à AGFl e AGTn.....	94
Tabela 31: Comparação dos parâmetros e resultados dos métodos estudados à AGFl e AGTn .....	95
Tabela 32: 20 contingências de ordem $k = 1$ mais graves segundo <i>ISGFl</i> - rede real .....	96
Tabela 33: 20 contingências de ordem $k = 1$ mais graves segundo <i>ISGv</i> - rede real.....	97
Tabela 34: 30 contingências de ordem $k = 2$ mais graves segundo <i>ISGFl</i> - rede real .....	98
Tabela 35: 30 contingências de ordem $k = 2$ mais graves segundo <i>ISGv</i> - rede real.....	99
Tabela 36: Parâmetros relativos à população testados para AGFl quando $k = 2$ na rede real .....	101
Tabela 37: Probabilidades dos operadores testadas para AGFl quando $k = 2$ na rede real	101
Tabela 38: Melhores parametrizações encontradas na fase 1 para AGFl quando $k = 2$ na rede real .....	102
Tabela 39: Parâmetros relativos à epidemia testados para AGFl quando $k = 2$ na rede real .....	102
Tabela 40: Parâmetros relativos à supressão testados para AGFl quando $k = 2$ na rede real .....	103
Tabela 41: Parâmetros relativos à busca local testados para AGFl quando $k = 2$ na rede real .....	103
Tabela 42: Melhor parametrização encontrada na fase 2 para AGFl quando $k = 2$ na rede real .....	104
Tabela 43: Melhor parametrização encontrada para AGFl quando $k = 2$ na rede real .....	104
Tabela 44: Melhores parametrizações encontradas na fase 1 para AGTn quando $k = 2$ na rede real .....	107
Tabela 45: Melhor parametrização encontrada na fase 2 para AGTn quando $k = 2$ na rede real .....	107
Tabela 46: Melhor parametrização encontrada para AGTn quando $k = 2$ na rede real .....	108
Tabela 47: Resultados obtidos para o AGFl na rede real .....	110
Tabela 48: Resultados obtidos para o AGTn na rede real .....	110



## LISTA DE ABREVIATURAS

AC	Corrente Alternada
AD	Análise Dinâmica
AE	Análise Estática
AG	Algoritmo(s) Genético(s)
AGFl	Algoritmo Genético Para Seleção de Contingências por Critério de Violações de Fluxo de Potência Ativa
AGTn	Algoritmo Genético Para Seleção de Contingências por Critério de Violações de Tensão nas Barras
API	<i>Application Program Interface</i>
ART	<i>Adaptive Resonance Theory</i>
AS	Análise de Segurança
DC	Corrente contínua
DCI	<i>Double line contingency index</i>
FACTS	<i>Flexible AC Transmission Systems</i>
FCDR	Fluxo de Potência Desacoplado Rápido
GAOT	<i>Genetic algorithm optimization toolbox</i>
IP	Índice de performance
ISv	Índice de Severidade de Tensão
ISFl	Índice de Severidade de Fluxo
ISGFl	Índice Genético de Severidade de Fluxo
ISGv	Índice Genético de Severidade de Tensão
PSO	<i>Particle Swarm Optimization</i>
SEP	Sistema(s) Elétrico(s) de Potência
TCSC	<i>Thyristor controlled series compensator</i>
VSI	<i>Voltage sensitivity index</i>



## LISTA DE SIGLAS

IEEE *Institute of Electrical and Electronic Engineers*



## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>24</b>
<b>2 ANÁLISE DE SEGURANÇA EM REDES ELÉTRICAS.....</b>	<b>26</b>
2.1 Conceitos básicos.....	26
2.2 Centros de controle e operação .....	27
2.3 Análise de Segurança .....	28
2.4 Fluxo de Potência .....	31
2.5 Seleção de Contingências.....	33
2.5.1 Índices de Performance, Classificação direta e Triagem.....	33
2.5.2 Relaxação concêntrica e Métodos de fronteira.....	34
2.5.3 Redes neurais artificiais .....	35
2.5.4 Metaheurísticas e outros trabalhos .....	36
<b>3 ALGORITMOS GENÉTICOS .....</b>	<b>39</b>
3.1 Conceitos básicos.....	39
3.2 Codificação.....	40
3.3 Esquemas e blocos de construção .....	41
3.4 População inicial.....	43
3.5 Função de aptidão .....	44
3.6 Reprodução.....	45
3.6.1 Cruzamento .....	45
3.6.2 Mutação.....	46
3.6.3 Inversão .....	48
3.7 Seleção .....	48
3.7.1 Roleta .....	48
3.7.2 Elitismo .....	49
3.7.3 Seleção por posicionamento ( <i>ranking</i> ).....	49
3.7.4 Seleção por torneio.....	50
3.7.5 Seleção por dimensionamento Sigma.....	50
3.8 Outros operadores.....	51
3.9 Critério de parada.....	51
3.10 Restrições de problemas de otimização.....	51
3.11 Linhas gerais para sucesso de um AG .....	52
3.12 Utilização dos Algoritmos Genéticos em SEP .....	52
<b>4 AGFL E AGTN PARA SELEÇÃO DE CONTINGÊNCIAS.....</b>	<b>56</b>
4.1 Funcionamento de AGFL e AGTn.....	57
4.1.1 Codificação do cromossomo .....	59
4.1.2 Função de aptidão.....	61
4.1.3 População e População de retorno .....	63
4.1.4 Elitismo .....	64
4.1.5 Seleção .....	64
4.1.6 Cruzamento .....	65
4.1.7 Mutação.....	66
4.1.8 Epidemia .....	66
4.1.9 Supressão do espaço de buscas .....	67
4.1.10 Busca local .....	67
4.2 Parâmetros dos AGFL e AGTn.....	67
4.2.1 Parâmetros gerais .....	68
4.2.2 Parâmetros da epidemia .....	68
4.2.3 Parâmetros da supressão do espaço de buscas .....	69
4.2.4 Parâmetros da busca local .....	69



<b>5 METODOLOGIA .....</b>	<b>70</b>
<b>5.1 Metodologia de averiguação da eficácia do método .....</b>	<b>70</b>
5.1.1 Taxa de captura .....	70
5.1.2 Percentual do espaço de busca .....	71
5.1.3 Tempo de execução .....	72
<b>5.2 Metodologia dos testes das parametrizações dos AG .....</b>	<b>72</b>
<b>6 TESTES E RESULTADOS NA REDE IEEE30.....</b>	<b>75</b>
<b>6.1 Características da rede IEEE30.....</b>	<b>75</b>
<b>6.2 Testes na rede IEEE30 .....</b>	<b>79</b>
<b>6.3 Testes e resultados de AGFl para a rede IEEE30 e contingências de ordem <math>k = 1</math> .....</b>	<b>80</b>
6.3.1 Tamanho de população e probabilidade dos operadores.....	80
6.3.2 Epidemia, supressão e busca local .....	81
6.3.3 Resultados do AGFl na rede IEEE30 para contingências de ordem $k = 1$ .....	81
<b>6.4 Testes e resultados do AGTn para a rede IEEE30 e contingências de ordem <math>k = 1</math>.....</b>	<b>82</b>
6.4.1 Tamanho de população e probabilidade dos operadores.....	82
6.4.2 Epidemia, supressão e busca local .....	83
6.4.3 Resultados do AGTn na rede IEEE30 para contingências de ordem $k = 1$ .....	83
<b>6.5 Testes e resultados de AGFl para a rede IEEE30 e contingências de ordem <math>k = 2</math> .....</b>	<b>84</b>
6.5.1 Tamanho de população e probabilidade dos operadores.....	84
6.5.2 Epidemia, supressão e busca local .....	85
6.5.3 Resultados de AGFl na rede IEEE30 para contingências de ordem $k = 2$ .....	87
<b>6.6 Testes e resultados de AGTn para a rede IEEE30 e contingências de ordem <math>k = 2</math>.....</b>	<b>89</b>
6.6.1 Tamanho de população e probabilidade dos operadores.....	89
6.6.2 Epidemia, supressão e busca local .....	89
6.6.3 Resultados de AGTn na rede IEEE30 para contingências de ordem $k = 2$ .....	90
<b>6.7 Conclusões dos testes na rede IEEE30 .....</b>	<b>92</b>
<b>6.8 Comparação com trabalhos similares .....</b>	<b>93</b>
<b>7 TESTES E RESULTADOS NA REDE REAL .....</b>	<b>96</b>
<b>7.1 Características da rede real.....</b>	<b>96</b>
<b>7.2 Testes na rede real.....</b>	<b>100</b>
<b>7.3 Testes e resultados de AGFl para a rede real e contingências de ordem <math>k = 2</math> .....</b>	<b>100</b>
7.3.1 Tamanho de população e probabilidade dos operadores.....	101
7.3.2 Epidemia, supressão e busca local .....	102
7.3.3 Resultados de AGFl na rede real para contingências de ordem $k = 2$ .....	105
<b>7.4 Testes e resultados de AGTn para a rede real e contingências de ordem <math>k = 2</math>.....</b>	<b>106</b>
7.4.1 Tamanho de população e probabilidade dos operadores.....	106
7.4.2 Epidemia, supressão e busca local .....	107
7.4.3 Resultados de AGTn na rede real para contingências de ordem $k = 2$ .....	108
<b>7.5 Conclusões dos testes na rede real .....</b>	<b>110</b>
<b>8 CONCLUSÃO .....</b>	<b>112</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica é um importante bem, compondo inclusive indicadores mundiais de desenvolvimento social e econômico. A importância dos Sistemas Elétricos de Potência é inerente a esta realidade. Grande parte dos sistemas produtivos e serviços dos quais necessitamos enquanto sociedade dependem da energia elétrica. A qualidade e a continuidade do fornecimento da Energia Elétrica são, portanto, imprescindíveis para nosso modo de vida moderno.

Neste contexto, a Análise de Segurança em Sistemas Elétricos de Potência adquire grande importância. Identificar possíveis distúrbios graves e proteger-se deles através de ações de controle são tarefas importantes dentro de centros de operação e controle. As contingências mais graves devem ser identificadas de forma segura e ágil, a fim de evitar colapsos de tensão, perda de carga atendida e até mesmo blecautes.

A tarefa de Seleção de Contingências é peça chave nesse processo, dado que a avaliação de todas as contingências possíveis em um Sistema Elétrico de Potência de grande porte seria impraticável. Apesar de todo o aumento do poder computacional ocorrido nas últimas décadas, severas restrições de tempo, impostas aos operadores nos centros de controle, inviabilizam totalmente uma análise exaustiva de todas as contingências possíveis. O tamanho das redes elétricas e suas características tornam o problema de difícil tratamento computacional.

Neste trabalho serão desenvolvidos dois Algoritmos Genéticos com vistas a fornecer uma lista de contingências mais graves sob os pontos de vista de violações de fluxos de potência ativa e violações de tensão nas barras. A escolha dos Algoritmos Genéticos foi baseada na grande capacidade desta metaheurística de varrer espaços de busca não lineares e não convexos a fim de localizar boas soluções para problemas de otimização. Os Algoritmos Genéticos são largamente utilizados em problemas de otimização, e também são largamente utilizados em problemas de otimização na área de Sistemas Elétricos de Potência. (NIMS, ELKEIB e SMITH, 1997), (OLIVEIRA, 2004), (PANDA e PADHY, 2008).

Posta a necessidade de encontrar uma lista de contingências severas, e a responsabilidade que a tarefa impõe, um método eficaz foi selecionado para avaliar as contingências. O Fluxo de Potência Desacoplado Rápido é uma aproximação numérica do método de Newton-Raphson largamente utilizada e aceita (ALBUQUERQUE, 2005), e sua eficiência é competitiva para a utilização em métodos de triagem (STOTT e ALSAC, 1973), (CARPENTIER, 1993).

Tendo em vista a importância da tarefa de Seleção de Contingências na Análise de Segurança Estática em redes elétricas, e das severas restrições de tempo impostas à operação nos centros de controle, o principal objetivo deste trabalho é estudar a utilização de um Algoritmo Genético (AG) e permitindo sua utilização em redes reais de grande porte. Outro objetivo do trabalho é verificar a eficiência do método apresentado. As contribuições deste trabalho para melhorar as propostas existentes serão:

- a) Permitir a avaliação de contingências múltiplas através de um método eficaz e robusto;
- b) Permitir a avaliação de contingências tanto sob o ponto de vista de violações de fluxos de potência ativa como sobre o ponto de vista de violações de tensão nas barras;

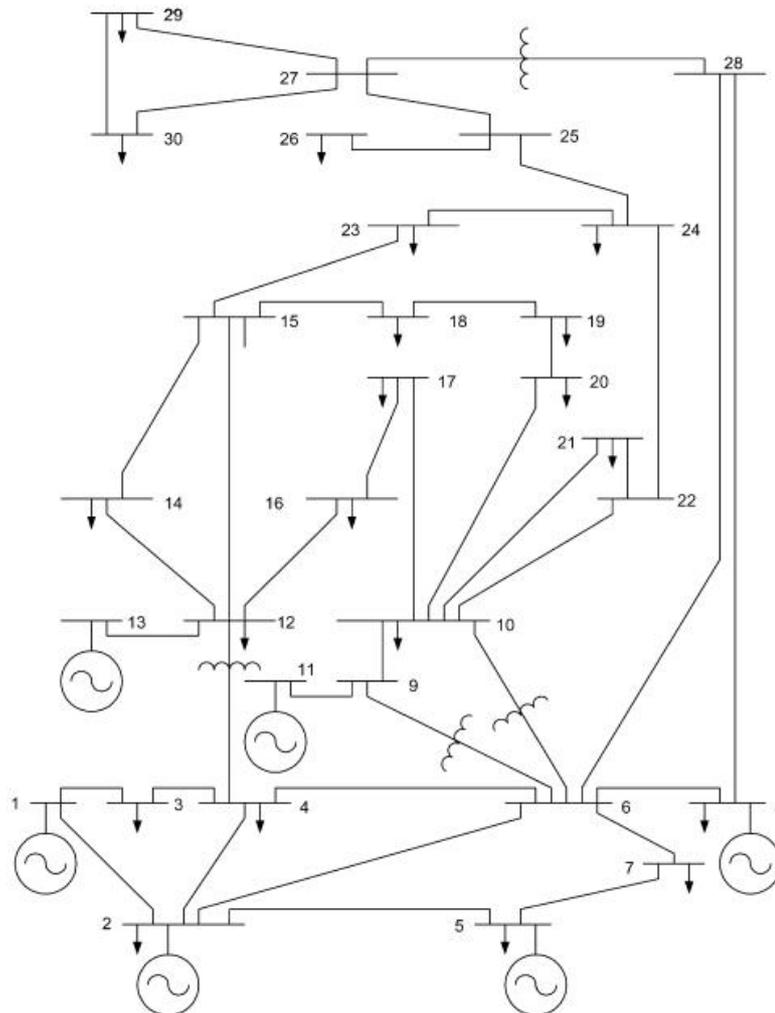
- c) Avaliar a convergência dos AG para a seleção de contingências em uma rede real de grande porte;

Este trabalho divide-se em outras 6 seções. As seções 2 e 3 compõem uma revisão bibliográfica sobre Análise de Segurança em Redes Elétricas e Algoritmos Genéticos, respectivamente. Na seção 4, por sua vez, o método desenvolvido é descrito. Na seção 5, são detalhadas as metodologias de averiguação da eficácia e da eficiência do método. Nas seções 6 e 7, os resultados da aplicação do método para as redes estudadas são apresentados, e, por fim, na seção 8, são descritas as conclusões deste trabalho.

## 2 ANÁLISE DE SEGURANÇA EM REDES ELÉTRICAS

### 2.1 Conceitos básicos

Uma **rede elétrica** é uma coleção de elementos elétricos interconectados de maneira específica (JOHNSON, 1990). Na figura 1 é apresentada a rede **IEEE30**, que é uma redução de um sistema real largamente utilizada para testes:



**Figura 1: Rede IEEE30**

Fonte: (ABIDO, 2002)

Os **Sistemas Elétricos de Potência** (SEP) utilizados atualmente nos países são compostos por grandes redes complexas e fortemente conexas. Nessas redes os geradores operam de forma síncrona em um equilíbrio dinâmico, adaptando a geração de energia às cargas existentes. Esta sincronia deve ser mantida a despeito da flutuação das cargas, que são causadas por alterações no consumo ou mesmo por distúrbios oriundos de **contingências** (TOMSOVIC, 2005).

Uma **Contingência** é a saída de operação de algum equipamento da rede, como um gerador, um transformador ou uma linha de transmissão, por exemplo (SUDERSAN,

ABDELRAHMAN e RADMAN, 2004). As contingências podem ocorrer por problemas atmosféricos, incêndios, erros humanos, falhas em equipamentos, entre outros (ALMEIDA e PESTANA, 2005). Contingências podem ser **simples**, ou seja, quando apenas um equipamento sai de operação, ou podem ser **múltiplas**, quando dois ou mais equipamentos saem de operação (BALU, BERTRAM, *et al.*, 1992).

**Segurança** consiste em estar livre de risco ou perigo. Segurança em SEP é uma condição instantânea e dependente do tempo que reflete a robustez de um SEP quanto a distúrbios eminentes, ou ainda o complemento do risco da redução do desempenho ou mesmo rompimento de um sistema ainda inabalado (BALU, BERTRAM, *et al.*, 1992).

**Segurança do sistema** envolve práticas desenvolvidas para manter o sistema funcional quando componentes falham. Segurança é a habilidade de um sistema em permanecer funcional sem consequências graves mesmo após a ocorrência de qualquer contingência contida em uma lista prévia de contingências “possíveis”. (SRIVANI e SWARUP, 2008)

**Estabilidade** consiste na habilidade de um SEP, dado um estado de operação inicial, de obter um estado de equilíbrio operacional após ser submetido a um distúrbio físico, onde a maior parte das variáveis tenha permanecido em seus limites de operação, de forma que praticamente todo o sistema permaneça intacto (KUNDUR, PASERBA, *et al.*, 2004).

**Medição de segurança** é a análise realizada no intuito de determinar se, e em que extensão, um SEP está razoavelmente seguro quanto a interferências sérias em sua operação (BALU, BERTRAM, *et al.*, 1992).

## 2.2 Centros de controle e operação

**Centros de controle** são estruturas onde engenheiros observam e controlam um sistema elétrico com vistas a manter a estabilidade e a segurança do sistema. Em um centro de controle, existem diversas ferramentas de *software* e *hardware* envolvidas no processo de manter uma rede elétrica operante. O tamanho de uma rede elétrica impacta diretamente nos controles necessários e no tamanho de um centro de controle (TOMSOVIC, 2005), (CHEN, 2004).

Os sistemas de computação utilizados em centros de controle têm evoluído. Os **sistemas hierárquicos** ainda são utilizados em muitos centros, mas sistemas de processamento distribuído e **arquiteturas de sistemas abertos** (*Open systems*) vêm sendo empregados ao longo dos últimos anos. Nesses sistemas a interoperabilidade entre plataformas e a flexibilidade de *software* e *hardware* ganham destaque (CHEN, 2004).

Entre as funções de um centro de controle está a análise do sistema, que é o ponto base para a análise de segurança (GERHARDT, 2007). O esquema padrão destas funções é composto pelos seguintes itens:

- a) **Configurador:** É responsável pela construção do modelo de rede, e leva em consideração eventuais mudanças topológicas na rede (COSTA e LEÃO, 1993), (VUONG, LEFEBVRE e DO, 2002);
- b) **Estimador:** Responsável por obter o estado para a parte observável da rede (a parte da rede da qual o centro de controle dispõe de dados), eliminando erros

grosseiros de medições do sistema. (COSTA e LEÃO, 1993), (VUONG, LEFEBVRE e DO, 2002);

- c) **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 (DOPAZO, DWARAKANATH, *et al.*, 1977), (DOBRIJEVIC e POPOVIC, 2010);
- d) **Fluxo de potência *on line*:** Determina as grandezas elétricas nas barras de geração, barras de carga, e linhas. Após esses cálculos, um modelo do estado atual da rede, passível de estudos e análises, é construído (TINNEY e HART, 1967), (GERHARDT, 2007);
- e) **Análise de Segurança:** Simulações de contingências são realizadas e seus desdobramentos são estudados para garantir a operação segura da rede. Existem restrições de tempo impostas a esta tarefa, e por isso diversas técnicas foram desenvolvidas ao longo do tempo para ajudar nesta tarefa (EJEBE e WOLLENBURG, 1979), (CARPENTIER, 1993), (DEVARAJ, YEGNANARAYANA e RAMAR, 2002). Algumas destas técnicas serão estudadas nas próximas seções;
- f) **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 da operação mais visto em décadas passadas considera principalmente aspectos financeiros, embora aspectos ambientais tenham ganhado grande enfoque nas últimas duas décadas (DOMMEL e TINNEY, 1968), (MONTICELLI, PEREIRA e GRANVILLE, 1987), (AURICH, 2004), (DINU, ODAGESCU e MOISE, 2011);

## 2.3 Análise de Segurança

A Análise de Segurança em Redes Elétricas (AS) envolve a avaliação de dados da rede para estimar o **estado de operação** atual da rede e como esse estado de operação pode evoluir em um determinado (e geralmente curto) espaço de tempo (BALU, BERTRAM, *et al.*, 1992).

O crescimento constante da demanda energética, aliado aos insuficientes investimentos no sistema e à reestruturação do setor elétrico, tem contribuído para a operação dos sistemas de energia elétrica nas proximidades de seus limites de transmissão, o que torna a AS muito importante (KABOURIS, VOURNAS, *et al.*, 2000).

Além de propiciar segurança durante a operação de redes elétricas, etapas de AS podem ser executadas durante o planejamento, ou planejamento de expansão, de uma rede elétrica. Essa aplicação é menos restritiva em termos de tempo, porém é importante para minimizar problemas durante a operação de uma rede implantada (SILVA JÚNIOR, 2005).

Existem 3 componentes básicos da Análise de Segurança e Controle *on-line*: **Monitoramento, medição e controle**. Esses 3 componentes dividem-se em 5 operações básicas: **Monitoramento da segurança, Medição da segurança, Melhoria da segurança, Controle de Emergências e Controle restaurativo** (SRIVANI e SWARUP, 2008).

O monitoramento da segurança consiste em medir as variáveis ambientais que afetam a segurança de um sistema. A medição de segurança, por sua vez, consiste em avaliar os

dados e estimar o nível de robustez do sistema (estado de operação). A melhoria da segurança consiste em ampliar a robustez do sistema através de **ações de controle** (BALU, BERTRAM, *et al.*, 1992).

**Ações de controle** são medidas protetivas de segurança do sistema que são acionadas automaticamente por dispositivos elétricos ligados à rede, ou por engenheiros operadores, a partir dos centros de controle (TOMSOVIC, 2005).

A **análise de contingências** é uma tarefa que testa uma lista pré-estabelecida de casos de contingências, simulando a falta do equipamento em questão e executando um fluxo de potência sobre a topologia alterada. Para cada simulação, o impacto provocado pela contingência no sistema elétrico é calculado, e ao final da simulação de toda a lista de contingências, o programa indica se o sistema atende às restrições de segurança (MONTICELLI, 1983).

A AS divide-se em **Análise Dinâmica** (AD) e **Análise Estática** (AE).

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

Os SEP de tamanho real podem ser afetados por uma ampla quantidade de comportamentos dinâmicos. Estes fenômenos podem variar entre fenômenos lentos (que ocorrem durante minutos ou horas) e fenômenos extremamente rápidos, que ocorrem em milissegundos. Embora diversos equipamentos de atuação local tenham sido desenvolvidos ao longo do tempo, alguns distúrbios possuem impactos em áreas distantes da contingência que os originou (TOMSOVIC, 2005).

A AD permite a captura e simulação da cronologia dos eventos, o que requer aquisição e processamento de grandes quantidades de dados, aumentando assim os tempos de simulação envolvidos. Atualmente algumas aplicações como técnicas de simulação com passo de integração variável, simulação *quasi*-dinâmica e processamento paralelo, vem reduzindo o tempo de simulação e propiciando o uso da AD em aplicações de tempo real (FRANCISCO, 2005).

A **Análise Estática** (AE) considera os sistemas de potência em equilíbrio, ou seja, ela parte do pressuposto de que as transições de potência ativa e magnitudes de tensão são consideradas por outras técnicas. A segurança estática é alcançada em um SEP quando todas as cargas são atendidas, as restrições de operação não são violadas e nenhuma contingência "possível" afetaria essas duas condições (CARPENTIER, 1993). O princípio do equilíbrio descrito acima permite que análises sejam realizadas de forma mais eficiente do que um estudo completo dos efeitos dinâmicos de um distúrbio.

A análise estática de segurança em SEP permite a detecção, através de simulação, de alguma violação de fluxo de linha ou tensão fora do limite, decorrente de uma contingência contida em uma lista de contingências. Este procedimento adquire grande importância em SEP de grande porte dada as restrições de tempo envolvidas na operação em tempo real. Identificar as contingências potencialmente danosas é importante para prosseguir com uma análise mais detalhada de cada uma delas, e este processo é chamado de **Seleção de Contingências** (DEVARAJ, YEGNANARAYANA e RAMAR, 2002).

A **Avaliação de Contingências** é uma das tarefas mais importantes tanto para o planejamento quanto para a operação de redes elétricas. Na etapa de planejamento, a

avaliação de contingências é utilizada para avaliar a performance de um SEP e a necessidade de expansão da capacidade de transmissão dado um crescimento na carga ou na geração. Na etapa de operação, a análise de contingências permite que o SEP seja mantido em estado seguro, onde os equipamentos operem dentro de suas margens de segurança e a energia seja entregue aos clientes dentro de critérios aceitáveis de qualidade (SRIVANI e SWARUP, 2008).

Os **estados de operação** tem um importante papel na AS: Eles permitem aos operadores conhecer o estado atual da rede e derivar deste estado ações de controle caso o estado de operação as exija.

Inicialmente foram definidos os três modos ou estados de operação de uma rede elétrica, que foram a base para todo o trabalho de Análise de Segurança que se segue. Eles foram definidos como os estados Preventivo, de Emergência e Restaurativo. O estado Preventivo é o estado de operação normal, porém o termo Preventivo empregado denota a necessidade constante de estressar o aspecto de segurança da rede durante o estado normal de operação. O objetivo de estressar o aspecto de segurança é garantir o objetivo de controle, que é atender aos consumidores sem interrupções no serviço e a um custo mínimo. 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 sistema é considerado em estado de Emergência quando o valor de referência de controle de algum aspecto de um componente é excedido, como, por exemplo, quando a tensão não pode ser mantida em um nível seguro para o consumo, ou quando a frequência cai a um nível que possa interromper algum equipamento importante. Outro problema possível é a perda de sincronia do sistema. O objetivo de controle do estado de Emergência é demover o sistema do estado de Emergência atendendo a maior quantidade possível de carga, deixando aspectos econômicos em segundo plano (DY LIACCO, 1967).

No estado Restaurativo, existe carga não atendida, e o objetivo de controle nesse estado é restaurar o atendimento de toda a carga no menor tempo possível (DY LIACCO, 1967).

Os estados de operação da rede foram revistos e o estado de alerta foi adicionado (CIHLAR, 1969). O estado de Alerta é similar ao estado Preventivo, onde todas as demandas são atendidas sem violações (SCHULZ e PRICE, 1984). O que diferencia o estado de Alerta do estado Preventivo 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 e KIRCHMAYER, 1971).

O conceito de despacho seguro foi expandido adicionando ao problema restrições que consideram a capacidade corretiva de um sistema após uma contingência (MONTICELLI, PEREIRA e GRANVILLE, 1987). Ao levar em consideração essas capacidades de correção, a formulação matemática permitiu a adoção de despachos menos conservadores sob o ponto de vista de segurança e mais rentáveis sob o ponto de vista econômico. Foram adicionados novos estados de operação que refletem o modelo matemático de despacho seguro e econômico (STOTT, ALSAC e MONTICELLI, 1987).

Os estados de operação definidos neste trabalho são utilizados em trabalhos atuais (GUERRA, 2002).

Na tabela 1 estão listados os estados de operação de uma rede elétrica:

**Tabela 1: Estados de operação de uma rede elétrica**

Nível	Estado	Descrição
Nível 1	Seguro	Carga atendida. Não existem violações nos limites de operação. Caso alguma contingência ocorra, não haverá violações.
Nível 2	Corretivamente seguro	Carga atendida. Não existem violações nos limites de operação. Qualquer violação causada por uma contingência pode ser corrigida por uma ação de controle sem que haja perda de carga.
Nível 3	Alerta	Carga atendida. Não existem violações nos limites de operação. Algumas violações causadas por uma contingência não podem ser corrigidas sem perda de carga.
Nível 4	Emergência corrigível	Carga atendida, porém existem violações nos limites de operação. Essas violações podem ser corrigidas por ações apropriadas de controle sem que haja perda de carga.
Nível 5	Emergência não corrigível	Carga atendida, porém existem violações nos limites de operação. Essas violações não podem ser corrigidas por ações apropriadas de controle sem que haja perda de carga.
Nível 6	Restaurativo	Sem violação nos limites de operação, porém houve perda de carga.

Fonte: Adaptado de (GERHARDT, 2007) e (GUERRA, 2002).

Durante a avaliação de contingências são encontradas algumas que causariam desconexões de partes da rede. Essas desconexões, decorrentes de saídas de linhas ou transformadores, são conhecidas como ilhamentos. Os ilhamentos inviabilizam o cálculo de obtenção do estado da rede, dado que as matrizes envolvidas nos cálculos tornam-se singulares. Na abordagem clássica do problema, as contingências que causam ilhamentos são apenas marcadas para uma avaliação posterior mais detalhada. Canto dos Santos & Garcia (1998), desenvolveram um método onde essas contingências são ordenadas através da utilização de um modelo linearizado do fluxo de potência com a sobreposição de uma rede fictícia. Esse procedimento permite ordenar por gravidade as contingências que causariam ilhamentos (CANTO DOS SANTOS e GARCIA, 1998).

Uma prática comum para medir a segurança de um SEP consiste em avaliar uma lista pré-definida de possíveis contingências, e classificar o sistema como inseguro, caso a ocorrência de alguma contingência da lista leve o sistema a um estado onde existam violações em seus limites de operação ou não atendimento de cargas (BALU, BERTRAM, *et al.*, 1992).

## 2.4 Fluxo de Potência

O Método de Newton (TINNEY e HART, 1967) consiste na aplicação formal de um algoritmo genérico para resolver equações não lineares, e se constitui de sucessivas soluções da equação (1) (MOURA e MOURA, 2010):

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

onde:

$\Delta P$ : vetor dos resíduos de potência ativa;

$\Delta Q$ : vetor dos resíduos de potência reativa;

$H$ : matriz de dimensões  $(NPQ + NPV) \times (NPQ + NPV)$ ;

$N$ : matriz de dimensões  $(NPQ + NPV) \times (NPQ)$ ;

$M$ : matriz de dimensões  $(NPQ) \times (NPQ + NPV)$ ;

$J$ : matriz de dimensões  $(NPQ) \times (NPQ)$ ;

$NPQ$ : número de barras com potências ativa e reativa especificadas;

$NPV$ : número de barras com módulo de tensão e potência ativa gerada especificadas;

$\Delta \theta$ : vetor das mudanças incrementais dos ângulos de tensões;

$\Delta V$ : vetor das mudanças incrementais dos módulos de tensões;

$V$ : vetor dos módulos de tensões.

O método do **Fluxo de Potência Desacoplado Rápido** (FCDR) é uma particularização do método de Newton-Raphson em que apenas as dependências entre a tensão e a potência ativa ( $V$  e  $Q$ ) e entre a potência ativa e ângulo da tensão da barra ( $P$  e  $\theta$ ) são levadas em consideração. É um método simples, confiável e eficiente de calcular um Fluxo de Potência. Essas características o tornam muito atraente para o cálculo de contingências *on-line* de redes de qualquer tamanho (STOTT e ALSAC, 1973), sendo que a solução de um FCDR é bem aceita como base para cálculos de Índices de Performance (ALBUQUERQUE, 2005).

Após negligenciar as submatrizes acopladas  $[N]$  e  $[J]$  da equação (1), e realizar uma série de aproximações e simplificações permitidas pelas características do problema abordado, as equações finais do fluxo de potência desacoplado podem ser escritas da como escrito nas equações (2) e (3) (STOTT e ALSAC, 1973):

$$[\Delta P/V] = [B'][\Delta \theta]; \quad (2)$$

$$[\Delta Q/V] = [B''][\Delta V]. \quad (3)$$

As matrizes  $[B']$  e  $[B'']$  são reais e esparsas, e contêm as estruturas das submatrizes do Jacobiano do fluxo de carga  $[H]$  e  $[L]$ , respectivamente. Estas matrizes contêm apenas admitâncias, e precisam ser triangularizadas apenas uma vez no começo do método. A matriz  $[B'']$  é simétrica, o que permite que apenas parte dela seja armazenada. O processo de aproximação consiste em solucionar as equações acima de forma alternada até que  $[\Delta P/V]$  e  $[\Delta Q/V]$  sejam 0. Cada ciclo compreende uma solução de  $[\Delta \theta]$  para atualizar  $[\theta]$  e uma solução de  $[\Delta V]$  para atualizar  $[V]$  (STOTT e ALSAC, 1973).

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 e LO, 2006). Outros métodos têm sido estudados para a execução de um cálculo aproximado do fluxo de potência. O FINFLO demonstrou gerar melhores resultados que o método 1P-1Q nos testes realizados, porém de forma menos eficiente (MENG, XUE e LO, 2006). Os testes foram realizados em 3 redes: IEEE14, IEEE57 e IEEE300.

O método FINFLO foi considerado um avanço (CHIEN, CHENG, *et al.*, 2007) e foi novamente estudado, desta vez para contingências duplas de linha (MENG, XUE e LO, 2009). Novamente o método obteve resultados mais precisos que o método 1P-1Q, as expensas de um pouco de eficiência, também para as redes IEEE14, IEEE57 e IEEE300 (MENG, XUE e LO, 2006).

Embora este método tenha sido encontrado, o método 1P-1Q é ainda mais utilizado e largamente estudado em outros trabalhos, inclusive com melhorias em sua eficiência sem perda de sua eficácia (MENG, XUE e LO, 2006).

## 2.5 Seleção de Contingências

A função da etapa de seleção de contingências é reduzir a lista de contingências a ser avaliada pela etapa de análise de contingências (GUERRA, 2002). Nas subseções seguintes algumas técnicas de seleção de contingências são apresentadas.

### 2.5.1 Índices de Performance, Classificação direta e Triagem

Nos estudos de planejamento, a abordagem utilizada para a análise de contingências consiste em simular a saída de operação de uma ou mais unidades de geração ou transmissão para investigar os efeitos dessa saída de operação sobre a rede, e, dessa forma, estudar seu desempenho e sua confiabilidade. No ambiente de operações essa abordagem é proibitiva devido ao tempo de processamento necessário, e, por outro lado, estudar apenas as contingências baseado no critério de experiência de um operador poderia omitir contingências importantes (EJEBE e WOLLENBURG, 1979).

Um índice de performance é um escalar que reflete a severidade global dos efeitos de uma contingência (CHEN e BOSE, 1989), e o seu objetivo na análise de segurança é mostrar o quão grave uma contingência pode ser (ALBUQUERQUE, 2005), (SUDERSAN, ABDELRAHMAN e RADMAN, 2004). A formulação geral de um índice de performance pode ser definida conforme a fórmula (4):

$$PI = \sum_j w_j |f_j(x)|^m, \quad (4)$$

onde:

$w_j$ : peso relativo à função  $f(x)$ ;

$f_j(x)$ : função de performance;

$m$ : coeficiente de diferenciação.

Um Índice de Performance geralmente é uma relação entre alguma grandeza elétrica e seu limite de operação no equipamento avaliado. O coeficiente de variação é utilizado para que grandes violações sejam diferenciadas de conjuntos de pequenas violações, no intuito de evitar mascaramentos, por exemplo.

Ejebe & Wollenburg (1979) apresentaram uma metodologia desenvolvida para a classificação de contingências em linhas de transmissão e geradores baseada na severidade de seus efeitos na tensão dos barramentos ou nos fluxos de linha. O método desenvolvido foi baseado no Teorema de Tellegens (DIRECTOR e ROHRER, 1969) para avaliar a sensibilidade em um índice de performance após as contingências, utilizando as equações para o fluxo de carga não linear AC e o modelo simples de fluxo de carga DC. Após a avaliação e classificação de cada contingência pelo método, as contingências eram ordenadas e apenas as mais severas eram avaliadas pelo fluxo de carga completo.

Na **classificação direta** (*direct ranking*) um Índice de Performance é formulado de tal forma que possa ser calculado de forma direta, ou seja, sem conhecer as tensões individuais nos barramentos após uma contingência (CHEN e BOSE, 1989).

A classificação direta foi testada em uma rede real sem sucesso (IRISSARI, SASSON e LEVNER, 1979). O método gerou falsos alarmes, classificando como graves contingências que não eram graves.

Um dos grandes problemas da classificação direta é o **mascaramento**. O mascaramento ocorre quando contingências que causam algumas pequenas violações obtêm um valor do Índice de Performance maior que contingências que venham a causar grandes sobrecargas. Essa característica pode levar o algoritmo a ignorar contingências graves em detrimento de contingências menos graves (CARPENTIER, 1993), (MELIOPOULOS, CHENG e XIA, 1994).

Chen & Bose (1989) desenvolveram um método de classificação direta, voltado para a segurança de tensão. Neste trabalho foram obtidos resultados cuja eficácia é comparável ao método 1P-1Q para redes de 30, 118 e 662 barramentos, porém com eficiência superior. Alguns aspectos como a saída de operação de geradores ou mesmo restrições de geração de potência reativa geram dificuldades para a utilização da classificação direta (CHEN e BOSE, 1989).

Um método de **triagem** (ou *screening*) baseia-se geralmente em soluções de um fluxo de potência, podendo ser utilizados cálculos aproximados do fluxo de potência, como por exemplo, o método 1P-1Q (CARPENTIER, 1993). Os métodos de triagem são mais eficazes que métodos de seleção direta, embora menos eficientes sob o ponto de vista computacional (MELIOPOULOS, CHENG e XIA, 1994).

## 2.5.2 Relaxação concêntrica e Métodos de fronteira

A **relaxação concêntrica** parte do pressuposto de que o efeito de uma contingência possui um limite geográfico. O método procede dividindo o sistema em camadas, sendo que a camada zero contém as barras ligadas ao ramo contingenciado. As barras ligadas a estas barras da camada zero, ou o transformador das barras da camada zero, são incluídas na próxima camada, a camada um. O método prossegue, desta mesma forma, até completar a rede. Um determinado número de camadas é escolhido e o fluxo de potência é resolvido. A

eficiência é aumentada dada a solução de etapas parciais do problema (ZABORSKY, WHANG e PRASAD, 1980).

Os **métodos de fronteira** (*bounding*) permitem que o fluxo de potência seja resolvido apenas onde o efeito da contingência é realmente significativo. O efeito da saída de uma linha no fluxo de potência ativa, em uma outra linha arbitrária, pode ter seus limites superiores e inferiores obtidos por uma série de valores progressivamente mais próximos, sendo que o limite corresponderia a uma solução de Fluxo de Carga DC (GALIANA, 1984). Desta forma os fluxos de potência não seriam parciais apenas no número de iterações, mas também no número de nodos computados. Propriedades de desigualdades aliadas a técnicas de matrizes esparsas são utilizadas para reduzir o tempo de computação sem perdas significativas na acurácia do método (CARPENTIER, 1993), (BRANDWAJN, 1988).

### 2.5.3 Redes neurais artificiais

Técnicas de redes neurais artificiais permitem a extração de critérios de classificação através da análise supervisionada, ou não, de um conjunto complexo de padrões, aproximação de funções complexas não-lineares ou tolerância a falhas. Essa possibilidade as torna apropriadas para lidar com tarefas de análise de contingências. A maioria das técnicas de redes neurais artificiais possui uma etapa de treinamento *off-line* que possibilita um tempo de resposta que permite seu uso em tempo real (JOYA, LAGOS e SANDOVAL, 2010).

Devaraj, Yegnanarayana & Ramar (2002) utilizaram um Índice de Performance como valor alvo durante o treinamento de uma rede neural artificial utilizada para a classificação de contingências simples de ramo, apresentando resultados para a rede IEEE30. Cada contingência foi modelada como uma rede neural e treinada utilizando uma grande massa de dados de entrada, utilizando o Índice de Performance como valor alvo da rede. Durante o treinamento foi utilizado um método de seleção de características baseado em informação mútua para identificar quais as variáveis de entrada do modelo eram relevantes ante cada contingência. Segundo o artigo, após o treinamento a rede neural poderia classificar uma contingência quanto a várias condições de carga na rede.

Segundo Chakrabarti & Jeyasurya (2008), redes neurais artificiais têm recebido grande atenção dos pesquisadores como uma ferramenta para medição *on-line* da estabilidade de tensão, e, devido à natureza não-linear do problema da medição de estabilidade de tensão, as redes neurais artificiais são superiores aos métodos analíticos de monitoramento (CHAKRABARTI e JEYASURYA, 2008). Os autores utilizaram uma rede de funções de base radial para estimar margens de potência ativa para diferentes contingências. O trabalho considerou saídas simples de linha, variando as cargas de potência ativa e reativa e potência real de geradores para gerar casos base distintos para o treinamento da rede.

Isoda (2009) apresenta, em sua tese, uma proposta para análise da estabilidade estática de tensão de SEP utilizando uma rede neural baseada na arquitetura ART (*Adaptive Resonance Theory*). O problema da análise de estabilidade de tensão foi formulado considerando o estímulo de entrada composto pelas potências ativa e reativa nodais, e o estímulo de saída foi adotado como sendo a margem de segurança que representa a distância entre o ponto de operação do sistema e a fronteira da estabilidade estática de tensão. O cálculo da margem de segurança é realizado via análise de sensibilidade e álgebra matricial de Kronecker. A solução proposta enfatiza a rapidez de resposta e a flexibilidade de inclusão de novos padrões ou mudanças topológicas ao modelo.

#### 2.5.4 Metaheurísticas e outros trabalhos

Caso a terminologia e o mecanismo de funcionamento dos Algoritmos Genéticos (AG) não sejam conhecidos, é recomendada a leitura prévia da seção 3.

Meliopoulos, Cheng & Xia (1994) propõe um método híbrido de classificação de contingências. São definidas 3 classes de contingências: A classe A é composta por contingências que possivelmente causem mudanças não-lineares no sistema. A classe B contém contingências que causam descontinuidades, enquanto a classe C contém as outras contingências. Um índice heurístico foi definido para identificar as contingências da classe A, enquanto que um Índice de Performance foi utilizado para classificar as contingências nas classes B ou C. As contingências das classes A e B foram medidas através de um método de triagem utilizando FCDR, enquanto que as contingências da classe C utilizaram um Índice de Performance. Este método híbrido obteve uma taxa de captura (ver a definição de taxa de captura na seção 5.1.1) de 97% para uma rede com 306 barras, e uma taxa de captura de 95% para uma rede de 1304 barras (MELIOPOULOS, CHENG e XIA, 1994).

Saitoh, Takano & Toyoda apresentam um método de triagem de contingências de saídas duplas de linha (ou ramos) através de AG (SAITOH, TAKANO e TOYODA, 1996). Os cromossomos são formados através da justaposição de um índice inteiro único que representa cada ramo. A seleção é feita por roleta, o cruzamento de ponto único é utilizado e a mutação é realizada após o cruzamento. A função de aptidão é baseada na estabilidade transiente, que é formulada em uma função para evitar a análise dinâmica de cada contingência. Esta forma estática de ver um problema dinâmico é utilizada com vistas a aumentar a eficiência da triagem. Após os testes iniciais do trabalho, apenas um ponto subótimo do espaço de buscas pôde ser encontrado pelo método. Após a avaliação dos cromossomos do subótimo e do ótimo global, foi criado um mecanismo de supressão do espaço de buscas através do teorema do esquema. As características dos cromossomos de uma população são extraídas, e a compressão do espaço de buscas é realizada através da atribuição de uma baixa aptidão a todos os indivíduos da população que possam ser representados pelo esquema extraído. Esta interessante estratégia de diversificação permitiu que o ótimo global fosse encontrado. Os testes foram realizados em uma rede de 6 máquinas, 30 barramentos e 40 linhas, com uma taxa de crossover de 50% e uma taxa de mutação de 2%. O método com compressão do espaço de buscas mostrou-se mais efetivo em encontrar as contingências críticas sob o ponto de vista de estabilidade transiente. Este trabalho obteve bons resultados e apontou o AG como uma ferramenta robusta, porém o artigo ressalta a necessidade de testar o método em uma rede de proporções reais.

Nims, El-Keib & Smith apresentaram uma abordagem para ordenação de contingências baseada em AG (NIMS, EL-KEIB e SMITH, 1997). O problema foi formulado como um problema de otimização, e a severidade de uma contingência foi medida de acordo com o valor singular mínimo da Jacobiana de um Fluxo de Potência. Segundo o artigo, a execução da análise de contingências em todas as contingências possíveis seria proibitiva por questões de tempo, e, portanto, existiriam duas abordagens possíveis para a Análise de Contingências: Reduzir a quantidade de casos analisados ou analisar os casos de forma eficiente. Neste trabalho, o AG foi utilizado para reduzir a quantidade de casos avaliados. A cada contingência foi atribuído um código inteiro único, e o cromossomo foi definido como a codificação binária justaposta de dois equipamentos. Como a quantidade de equipamentos raramente é uma potência exata de 2, os operadores de cruzamento e mutação foram alterados para não permitir que cromossomos inválidos fossem gerados. Quando dois inteiros

representados por um cromossomo apontam para um mesmo equipamento, a contingência é considerada simples. O valor singular mínimo da Jacobiana de um Fluxo de Potência foi utilizado como valor de aptidão para o problema de minimização, e quando o cálculo não encontrava uma solução estável, o valor de aptidão era reduzido a 0. A quantidade de indivíduos da população foi definida em 20, e o critério de parada foi definido em 20 gerações. Como a análise de contingências tem como objetivo retornar um conjunto de contingências, o AG era reiniciado após 20 gerações com uma nova população inicial aleatória para obter novas contingências severas. Taxas de cruzamento e de mutação de 90% e 2%, respectivamente, foram utilizadas. A seleção foi realizada por torneio, e foram testadas 3 formas distintas de atribuir um número inteiro único a um equipamento: Na primeira forma, os números são atribuídos de acordo com a potência aparente de cada equipamento; na segunda forma, os equipamentos são divididos em áreas de controle de tensão através de um algoritmo de agrupamento de barras; na terceira forma, os identificadores dos equipamentos são atribuídos de forma aleatória. A preocupação com a codificação neste caso vem da percepção topológica do problema. Os testes procederam em redes IEEE30 e IEEE57 com duas formas do AG: A forma do AG simples (SGA) e um método híbrido com busca local. Com 70% dos casos avaliados, o método híbrido mostrou-se mais eficiente nas duas redes, sendo que a identificação baseada em potência aparente foi mais eficaz na rede IEEE30, enquanto que a identificação baseada em agrupamento de barras foi mais eficaz na rede IEEE57. A taxa de captura obtida foi de 99.5% na rede IEEE30 e 98.4% na rede IEEE57, respectivamente. Neste trabalho também não foram avaliadas redes de tamanho real

Guerra (2002) elaborou um método de seleção de contingências para violações de MW em ramos de SEP através de uma abordagem multinível adaptativa (GUERRA, 2002). A etapa de seleção de contingências é dividida em dois blocos. O primeiro bloco consiste em um pré-filtro de 3 estágios, onde através de uma rápida análise, utilizando heurísticas de folga e vizinhança, são eliminadas contingências inofensivas para a operação. O segundo bloco consiste em aplicar um FCDR às contingências restantes da lista, e calcular um Índice de Performance para ordenar esta lista de contingências, além de cálculos de ângulo de fase. Os filtros são testados nas redes IEEE14, IEEE30, IEEE118, e em uma rede de 904 barras e 1283 ramos. Diversas simulações foram realizadas, e o autor concluiu que o método de seleção proposto e implementado mostrou-se robusto e capaz de identificar corretamente as contingências mais severas em relação a violações de MW.

Sudersan, Abdelrahman e Radman (2004) propuseram um método para identificar a severidade de contingências duplas de ramo, e, em um segundo estágio, aumentar a segurança da rede através da alocação de TCSC e capacitores *shunt*. Os dois problemas foram abordados como problemas de otimização utilizando AG. Para o primeiro problema, a codificação através da justaposição da representação binária de dois identificadores inteiros únicos para os ramos foi utilizada. A severidade das contingências foi avaliada de acordo com dois índices: o DCI (*double line contingency index*) e o VSI (*voltage sensitivity index*). O VSI mede a magnitude de tensão total que excede todos os barramentos, enquanto que o DCI mede o sobrefluxo em todos os ramos. O primeiro problema utilizou dois AG, um para o DCI e outro para o VSI. Uma busca local foi utilizada em todos os indivíduos que possuíam um valor de aptidão diferente de zero. A população inicial foi definida de forma aleatória, e o cruzamento de ponto único foi utilizado, bem como uma alta de taxa de mutação com vistas a propiciar diversificação. O segundo problema foi abordado utilizando dois AG: Um para definir a localização de capacitores *shunt* e outro para definir a localização e a parametrização de TCSC. Uma função de aptidão baseada em uma regra de decisão foi implementada, determinando que indivíduos que não aumentavam a segurança eram considerados inaptos. A

regra de decisão era alterada de acordo a factibilidade do melhor indivíduo durante as últimas 5 gerações. Os algoritmos foram testados em redes IEEE14 e IEEE30. O primeiro algoritmo conseguiu obter uma taxa de captura de 96% dos casos críticos. Neste trabalho não foram realizados estudos em redes reais de grande porte.

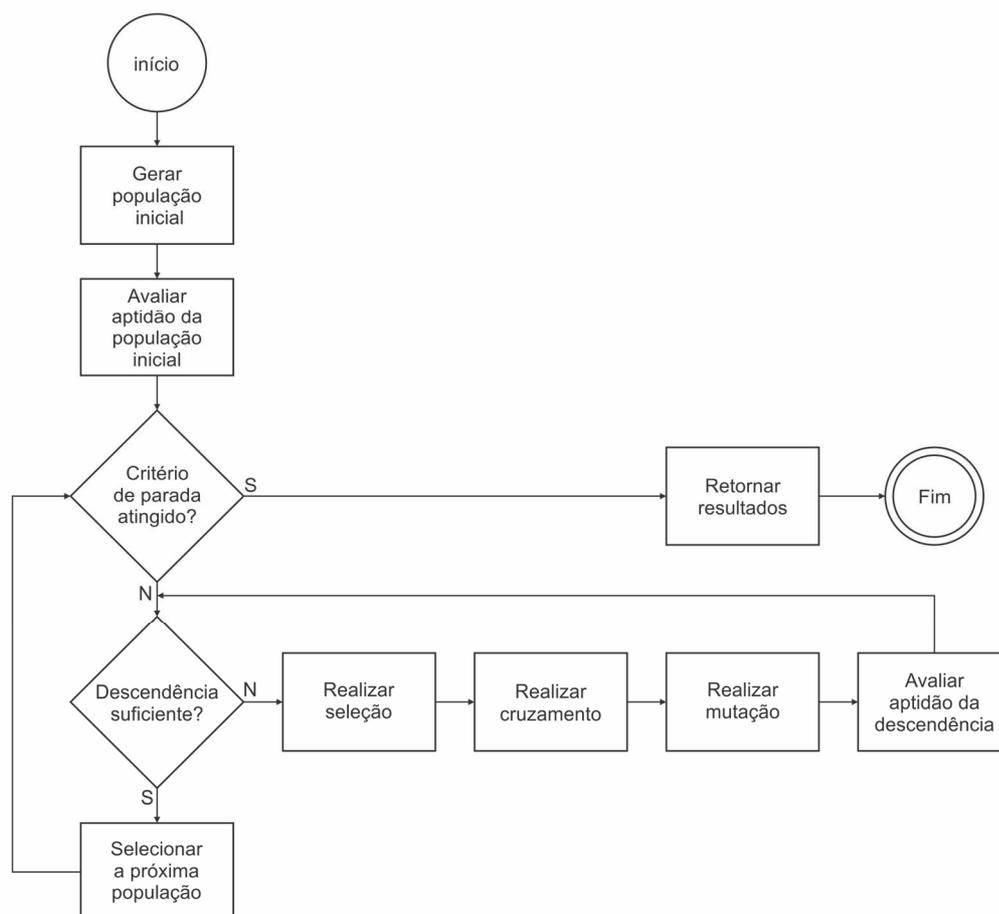
### 3 ALGORITMOS GENÉTICOS

#### 3.1 Conceitos básicos

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, os indivíduos mais aptos sobrevivem no meio e reproduzem-se através de um mecanismo de seleção natural. Em uma analogia com os mecanismos naturais evolutivos, os AG evoluem um conjunto de soluções codificadas para um determinado problema com o intuito de encontrar boas soluções para o problema modelado (QUINTELA, 2002).

Não há uma definição rigorosa de AG, aceita por todos na comunidade científica, que o diferencie de outros métodos de computação evolucionária, porém a maioria dos AG possui em comum a utilização de populações, cromossomos, seleção baseada em aptidão, cruzamento para produzir uma nova descendência e uma mutação randômica que a afete (MITCHELL, 1996).

Na figura 2 são mostrados os passos de um AG genérico contendo as suas etapas (GLOVER e KOCHENBERGER, 2003):



**Figura 2: Estrutura básica de um AG**

Fonte: Adaptado de (GLOVER e KOCHENBERGER, 2003).

Há cinco fatores que influenciam a performance de um AG (PHAM e KARABOGA, 2000). Esses fatores serão estudados nas seções subsequentes:

- O método de **codificação** que determina como as soluções são representadas;
- A **população inicial** que define o grupo de cromossomos criados no início do processo de evolução;
- A **função de aptidão**, que é a métrica de aptidão de um cromossomo;
- Os **operadores**, que determinam como a evolução ocorre ao longo das iterações;
- Os **parâmetros de controle**, que determinam como o algoritmo geral e os operadores se comportarão ao longo das gerações.

### 3.2 Codificação

Os AG permitem a separação das variáveis de decisão de um problema de sua representação. O vetor  $x$  é representado por uma palavra  $s$  de tamanho  $l$  sobre um alfabeto  $\beta^l$  usando uma função de mapeamento

$$c : \beta^l \mapsto \chi. \quad (5)$$

A aplicação desta função pode gerar palavras inválidas sob o ponto de vista do mapeamento das variáveis de decisão do problema. Para representar isso, o espaço de busca  $S$  é reduzido para eliminar as palavras inválidas através da relação

$$S \subseteq \beta^l. \quad (6)$$

Partindo dessa formulação inicial, o **gene** é definido como um elemento de uma palavra contida no espaço de busca  $S$  e um **alelo** é definido como um valor possível para um gene (GLOVER e KOCHENBERGER, 2003). Grande parte dos trabalhos utiliza  $\beta = \{0, 1\}$ , o que significa que palavras binárias são utilizadas nestes trabalhos para representar indivíduos (cromossomos) nas populações (GOLDBERG, 1989), (SAITOH, TAKANO e TOYODA, 1996), (NIMS, EL-KEIB e SMITH, 1997).

A codificação binária (sobre um alfabeto binário) é comumente utilizada por diversas razões (MITCHELL, 1996). Entre as razões citadas por Mitchell está o fato de que John Holland e seus estudantes seguiram essa codificação em seus trabalhos iniciais, e que por isso muito da teoria existente sobre AG é baseada na em cromossomos de tamanho fixo sobre o alfabeto binário. Além disso, segundo o autor, heurísticas para a definição apropriada dos parâmetros do AG foram, em sua maior parte, definidas no contexto da codificação binária.

### 3.3 Esquemas e blocos de construção

Um **esquema** descreve um subconjunto de cadeias com similaridades genéticas, ou seja, similaridades em algumas posições das cadeias (OLIVEIRA, 2004). Para descrever a similaridade deve ser adicionado um alelo  $*$  ao alfabeto  $\beta^l$ , que significa “qualquer alelo”, como um caractere curinga em uma cadeia de caracteres.

Uma **instância** é o conjunto de todos os cromossomos representados por um esquema. A figura 3 ilustra um exemplo de esquema e alguns cromossomos por ele representados:

Esquema	*	1	1	*	0	*	*	*
Cromossomo 1	0	1	1	0	0	0	0	1
Cromossomo 2	1	1	1	0	0	1	1	1
Cromossomo 3	0	1	1	1	0	1	0	0

**Figura 3: Esquema e alguns cromossomos da instância**

Fonte: Elaborado pelo autor.

A **ordem** de um esquema consiste no número de posições fixas que o esquema possui. O **comprimento de definição** é a distância entre a primeira e a última posições fixas dentro de um esquema (OLIVEIRA, 2004). No exemplo da figura 3, podemos ver um esquema de ordem 3 e comprimento de definição 4.

Um **bloco de construção** é um esquema de ordem baixa, comprimento de definição pequeno e com valor de aptidão acima do valor médio de seus membros na população (OLIVEIRA, 2004).

A ideia de esquemas e blocos de construção é muito importante para entender a convergência dos AG. O **teorema do esquema** nos fornece uma ideia aproximada da quantidade de cromossomos que sobreviverão ao longo das gerações. Essa ideia pode ser expressa matematicamente da seguinte forma (SAITOH, TAKANO e TOYODA, 1996):

$$M(S, t + 1) \approx \alpha(S)M(S, t); \quad (7)$$

$$\alpha(S) = \frac{f(S)}{f_{av}} \left( 1 - P_c \frac{\delta(S)}{l - 1} - O(S)P_m \right); \quad (8)$$

onde:

$M(S, t)$ : *esperança de cromossomos do esquema S na geração t;*

$f(S)$ : *valor de aptidão médio para os cromossomos pertencentes ao esquema S;*

$f_{av}$ : *valor de aptidão médio para todos os cromossomos;*

$\delta(S)$ : *comprimento de definição do esquema S;*

$l$ : *tamanho do cromossomo;*

$O(S)$ : *ordem do esquema;*

$P_c$ : *probabilidade de cruzamento;*

$P_m$ : *probabilidade de mutação.*

O símbolo matemático  $\approx$  significa “aproximadamente igual ou a imagem de” (WOLFRAM, 2012).

Partindo do teorema, é visto que esquemas com comprimento de definição pequena, baixa ordem e alto valor médio de aptidão do esquema tendem a sobreviver por um número maior de gerações (OLIVEIRA, 2004). Esta abordagem matemática permite avaliar estatisticamente ao longo das gerações bons esquemas, além de ser uma ferramenta eficaz para determinar a diversidade populacional e permitir a supressão do espaço de buscas (SAITOH, TAKANO e TOYODA, 1996), embora não possa ser usada de forma efetiva para estimativas de sobrevivência por muitas gerações (GLOVER e KOCHENBERGER, 2003).

O espaço de busca pode ser visto como um conjunto de **hiperplanos** de cromossomos que podem ser representados por esquemas (MAN e KWONG, 1999). Os operadores genéticos evoluem suas populações fazendo com que diferentes esquemas compitam entre si, criando um **paralelismo implícito**, pois vários hiperplanos são resolvidos em paralelo durante a evolução. A teoria sugere que a quantidade de cromossomos de cada esquema muda seu percentual de representação na população, de acordo com a aptidão relativa dos cromossomos

que pertencem a cada hiperplano. Segundo esta visão, esquemas “aptos” tendem a ter uma representatividade maior na população durante as gerações.

A ideia de paralelismo implícito foi inserida por Holland como uma das justificativas para a convergência do AG (GLOVER e KOCHENBERGER, 2003). Em uma população de tamanho  $M$ , um ciclo de geração avaliaria  $O(M^3)$  esquemas. Entretanto os esquemas não podem ser processados em paralelo, pois estimativas independentes de sua aptidão não podem ser obtidas de forma separada.

Segundo Glover & Kochenberger (2003), Holland justifica a ideia de realizar a busca sobre um alfabeto  $\beta^l$  ao invés do espaço de busca das variáveis de decisão  $\chi$ , com base nas ideias de paralelismo implícito e esquemas. A ideia de recombinação de pequenas partes de cromossomos, com bons esquemas, com partes maiores de cromossomos, é um método robusto para encontrar soluções ótimas. Essa ideia é conhecida como **Hipótese dos Blocos Construtivos** em (GOLDBERG, 1989).

### 3.4 População inicial

Tanto o tamanho da população inicial como a forma com a qual os seus indivíduos são definidos são relevantes e tem motivado diversos trabalhos na área, geralmente buscando um compromisso entre eficiência e eficácia. A escolha de uma população inicial pequena comprometeria a busca no espaço de soluções, enquanto que a utilização de um espaço de busca muito grande tornaria o método ineficiente (GLOVER e KOCHENBERGER, 2003).

A abordagem tradicional é definir o tamanho da população do AG no início da busca e mantê-la constante enquanto a busca ocorre. O tamanho da população impacta na evolução da busca, e o problema abordado pelo AG é fator chave na determinação do tamanho da população, o que torna essa definição uma tarefa difícil e importante (LOBO e LIMA, 2005).

Uma investigação sobre o tamanho da população para AG, com cromossomos baseados no alfabeto binário, encontrou uma relação entre o tamanho da população e o tamanho de um cromossomo (GOLDBERG, 1985):

$$p = 1.65 \times 2^{0.2 l}; \quad (9)$$

onde:

$p$ : tamanho da população;

$l$ : tamanho do cromossomo.

Reeves (1993) realizou um estudo sobre o tamanho populacional em diversas abordagens de AG com vistas a encontrar o tamanho mínimo de uma população para garantir que todo o espaço de busca possa ser atingido. O estudo parte do pressuposto de que cada ponto do espaço de busca só poderá ser atingido pela operação de cruzamento se existir ao menos um cromossomo onde cada gene assume cada alelo possível (REEVES, 1993). Partindo dessa afirmação, a probabilidade de que isso ocorra pode ser obtida:

$$P_2^* = \left(1 - \left(\frac{1}{2}\right)^{M-1}\right)^l; \quad (10)$$

onde:

$P_2^*$ : probabilidade de que ao menos um alelo esteja presente em cada posição;

$M$ : tamanho da população;

$l$ : tamanho do cromossomo.

Existe a possibilidade de que a população inicial seja formada por soluções boas previamente estabelecidas. A inclusão de soluções de boa qualidade na população inicial pode ajudar o AG a convergir mais rapidamente. Estas soluções baseadas em heurísticas ou em simulações prévias, embora possam ajudar o AG a convergir mais rapidamente, podem também levar o AG a uma convergência prematura (GLOVER e KOCHENBERGER, 2003).

### 3.5 Função de aptidão

A **função de aptidão** é a função que mede o quão boa uma solução é, sendo o principal elo de ligação entre o AG e o problema modelado. Ela pode ser escrita em forma de equação matemática ou elaborada como um conjunto de critérios ou regras que permitam a avaliação da qualidade de uma solução. Em outras abordagens, a função de aptidão pode conter penalidades para restrições do problema real que teriam maior custo computacional se modeladas nos operadores ou na etapa de seleção (PHAM e KARABOGA, 2000).

Os AG foram inicialmente desenvolvidos para propósitos de busca geral, sendo posteriormente analisados para a aplicação em problemas de otimização, abrindo assim um vasto ramo de pesquisa para as décadas subsequentes (DE JONG, 1975). Neste trabalho, os AG serão aplicados para resolver um problema de otimização, portanto uma formulação matemática aplicada a essa utilização foi adaptada de (GLOVER e KOCHENBERGER, 2003) e (PAPADIMITRIOU e KENETH, 1998). Inicialmente é assumido um espaço de busca discreto  $\chi$  e uma função:

$$f : \chi \mapsto \mathbb{R}. \quad (11)$$

A função escrita em (11) associa um elemento do espaço de busca discreto  $\chi$  a um valor real. Partindo desta definição de função de aptidão, segue a formulação geral de um problema de otimização, que pode ser escrita como:

$$\begin{aligned} \min_{x \in \chi} f & & (12) \\ \text{sujeito a } g_i(x) & \geq 0 & i = 1, \dots, m \\ h_j(x) & = 0 & j = 1, \dots, n \end{aligned}$$

A formulação (12) atende a um problema de otimização de minimização. Nas formulações acima,  $x$  representa um vetor contendo valores para as variáveis de decisão de um dado problema de otimização, e  $f$  é o valor de uma função objetivo, que para a aplicação de um AG pode equivaler à função de aptidão.

### 3.6 Reprodução

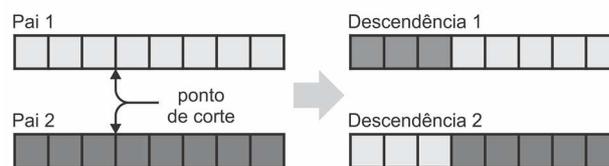
A forma mais comum de AG envolve a utilização de dois tipos de operadores de reprodução: **cruzamento** e **mutação** (MITCHELL, 1996).

#### 3.6.1 Cruzamento

A operação de cruzamento é muito importante para descobrir regiões promissoras do espaço de busca. A frequência com que os cruzamentos ocorrem é definida pela **frequência de cruzamento**. Uma frequência de cruzamento baixa diminui a velocidade de convergência na área de busca que está sendo examinada, enquanto que uma frequência de cruzamento muito alta leva a uma saturação no entorno de uma solução (PHAM e KARABOGA, 2000).

O cruzamento é definido como um operador que tenta simular a recombinação biológica entre dois indivíduos de uma população. A técnica consiste em escolher, de forma aleatória, uma determinada posição  $k$ . Após a escolha da posição  $k$ , duas trocas considerando as subsequências anteriores e posteriores à posição  $k$  são efetuadas entre os dois cromossomos, e dois novos cromossomos descendentes são gerados (MITCHELL, 1996).

Man & Kwong (1999) citam diversos tipos de cruzamento. Entre eles estão o **cruzamento de ponto único**, o **cruzamento de pontos múltiplos** e o **cruzamento uniforme**. O cruzamento de ponto único impossibilita que alguns cromossomos sejam obtidos, e esse problema pode ser resolvido utilizando o cruzamento de pontos múltiplos (MAN e KWONG, 1999). A figura 4 ilustra um exemplo de cruzamento de ponto único:

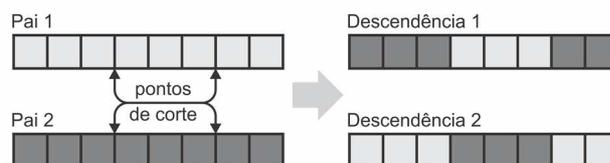


**Figura 4: Cruzamento de ponto único**

Fonte: Elaborado pelo autor.

No cruzamento de ponto único, um ponto de corte é escolhido aleatoriamente, e a descendência é gerada a partir da troca, entre os cromossomos, das partes anterior e posterior ao ponto de corte.

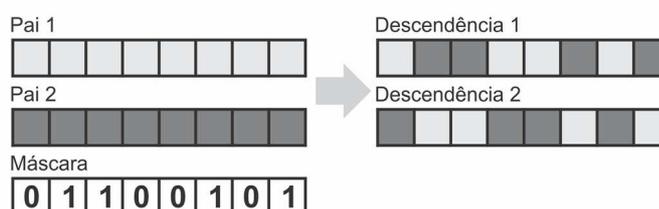
No **cruzamento de pontos múltiplos**, dois ou mais pontos de corte são escolhidos de forma aleatória, e a descendência é gerada a partir da alternância das partes dos cromossomos pais. A figura 5 ilustra um exemplo de cruzamento de pontos múltiplos:



**Figura 5: Cruzamento de pontos múltiplos**

Fonte: Elaborado pelo autor.

O **cruzamento uniforme** consiste em definir uma máscara binária aleatória, que aplicada aos pais definirá como será gerada a descendência. A figura 6 ilustra um exemplo de cruzamento uniforme:



**Figura 6: Cruzamento uniforme**

Fonte: Elaborado pelo autor.

Segundo De Jong (1975), dois pontos de corte para o cruzamento de pontos múltiplos seria o número ideal para a quantidade de pontos de corte. Esta abordagem é também conhecida como **cruzamento de dois pontos** (DE JONG, 1975).

Spears & De Jong (1991) mostraram que, quando uma população convergia em sua maior parte, o cruzamento de dois pontos reduz sua capacidade de gerar diversidade populacional (SPEARS e DEJONG, 1991).

O cruzamento uniforme, por alterar alelos em genes ao invés de segmentos de genes, pode destruir bons blocos. Porém, a capacidade de combinar características de forma independente da posição atual da busca acaba sobrepujando o problema de destruir blocos (MAN e KWONG, 1999).

Muitos experimentos foram realizados em diversos trabalhos, e de maneira geral, cada operador de cruzamento responde bem a determinados tipos de problema, exceto o operador de cruzamento de ponto único, que é considerado o mais deficitário (MAN e KWONG, 1999).

### 3.6.2 Mutação

A mutação consiste em alterar, de forma aleatória, um ou mais genes de um cromossomo. A operação de mutação é controlada pela **taxa de mutação** (GLOVER e KOCHENBERGER, 2003). Uma taxa de mutação alta colabora para aumentar a diversidade em uma população, mas pode, por outro lado, gerar instabilidade na busca. Entretanto, a localização de um ótimo global é muito difícil quando a taxa de mutação é baixa (PHAM e KARABOGA, 2000). A figura 7 ilustra um exemplo de mutação pela inversão de um *bit*:



**Figura 7: Mutação no 7º gene de um cromossomo**

Fonte: Elaborado pelo autor.

O papel da mutação é garantir que a diversidade populacional não seja perdida ao longo das gerações. A mutação pode ser vista como uma “política de segurança” para evitar a fixação de alguns alelos em cromossomos (MITCHELL, 1996).

Existem diferentes formas de implementar a mutação. Uma máscara binária pode ser definida a partir de uma distribuição de Bernoulli, onde para cada posição da máscara um número aleatório é gerado dizendo se esta posição será ou não alterada (GLOVER e KOCHENBERGER, 2003). A distribuição de Bernoulli citada utilizaria um valor baixo para  $p$  ( $p$  nesse caso indicaria a probabilidade de que um determinado gene tenha seu alelo alterado). Essa abordagem pode ser cara, sob o ponto de vista computacional, quando cromossomos possuem um tamanho grande. Outra abordagem comum é gerar um número aleatório para saber a quantidade de *bits* a ser invertida. Esse número obedeceria a uma distribuição de Poisson cujo parâmetro  $\lambda$  seria a quantidade de mutações médias por cromossomo (geralmente 1). Após conhecer a quantidade de *bits* que serão invertidos no cromossomo, bastaria sortear números aleatórios, obedecendo a uma distribuição uniforme, entre o intervalo de 1 e  $l$ , para definir quais genes seriam substituídos, e efetuar a mutação nesses genes.

Existem diversas formas de **mutação adaptativa**, desde taxas de mutação que variam em diferentes posições dentro de um cromossomo até alterações na probabilidade de mutação de acordo com a diversidade populacional (GLOVER e KOCHENBERGER, 2003).

Pham & Karaboga (2000) mostram três heurísticas para a utilização de **taxas de mutação variáveis**. Na primeira estratégia são definidas uma taxa mínima e uma taxa máxima de mutação, além de uma quantidade máxima de gerações onde o melhor valor de aptidão encontrado pode permanecer o mesmo, e um número mínimo de gerações sem subir a taxa de mutação. Enquanto a busca ocorre, a taxa de mutação varia para tentar sair de ótimos locais. Na segunda estratégia, a probabilidade de mutação para um determinado cromossomo é baseada em sua aptidão, sendo que cromossomos com maior aptidão tem menor probabilidade de mutação. Na terceira estratégia, os *bits* mais significativos tem uma probabilidade de mutação maior do que os *bits* menos significativos. Essa estratégia foi elaborada principalmente para problemas onde o cromossomo representa uma variável de decisão expressa por um número inteiro onde a sequência denota proximidade, e visa explorar melhor os espaços de busca no início da busca. Quando boas soluções são encontradas, a probabilidade de mutação nos *bits* mais significativos diminui, enquanto que a probabilidade de mutação nos *bits* menos significativos aumenta, para explorar mais o espaço de busca local (PHAM e KARABOGA, 2000).

### 3.6.3 Inversão

O operador de inversão foi criado para evitar os problemas de ligação no cruzamento de ponto único, que impede que alguns cromossomos sejam obtidos através deste tipo de cruzamento. O operador de inversão opera invertendo as posições dos *bits* entre um intervalo de posições aleatoriamente definido. Para impedir que essa inversão afete a aptidão do cromossomo, um índice auxiliar determina a posição do *bit* invertido no cromossomo original. A inclusão de índices gera a necessidade de um esforço computacional extra e de abordagens mais sofisticadas para o cruzamento, além de espaço extra para armazenamento dos índices, o que torna esse operador pouco utilizado (MITCHELL, 1996). A figura 8 ilustra um exemplo de inversão de *bits*:



**Figura 8: Inversão dos bits entre as posições 2 e 4**

Fonte: Elaborado pelo autor

## 3.7 Seleção

A **seleção** é uma etapa que escolhe, dentre os cromossomos pertencentes a uma população, aqueles que participarão da etapa de reprodução, sendo que os cromossomos mais aptos terão uma probabilidade maior de serem selecionados para reproduzir (MITCHELL, 1996), (MEDEIROS, 2002).

### 3.7.1 Roleta

No método da **roleta**, a seleção ocorre através dos seguintes passos (MAN e KWONG, 1999):

- A soma dos valores de aptidão de todos os membros da população é calculada e chamada de  $F_{sum}$ ;
- Um número aleatório entre 0 e  $F_{sum}$  é gerado;
- O primeiro indivíduo cujo valor de aptidão adicionado ao valor de aptidão de todos os indivíduos anteriores superar o número aleatório gerado, é selecionado e retornado;

A roleta é girada tantas quantas vezes forem necessárias para selecionar os indivíduos para a etapa de reprodução (MITCHELL, 1996).

Um problema associado à seleção pela roleta é encontrar uma medida associativa eficaz entre a aptidão populacional e a setorização da roleta. Segundo o autor, a utilização da

função de aptidão raramente basta, pois a escala na qual a função de aptidão se baseia influenciaria na decisão (GLOVER e KOCHENBERGER, 2003). Um exemplo seriam os valores de aptidão de 10 e 20 em um determinado caso e de 1010 e 1020 em outro.

### 3.7.2 Elitismo

O **elitismo** foi introduzido por De Jong em 1975, e consiste em reter determinado número de indivíduos mais aptos a cada geração, com a ideia de que estes indivíduos poderiam ser perdidos mediante operações de cruzamento ou mutação. Pesquisadores de AG encontraram melhorias significativas utilizando o elitismo (MITCHELL, 1996).

### 3.7.3 Seleção por posicionamento (*ranking*)

Mitchell (1996) define o **posicionamento** como um método alternativo cujo propósito é prevenir uma convergência muito rápida. Nesta abordagem os indivíduos são ordenados pelo seu valor de aptidão, sendo que o pior valor de aptidão recebe um índice de 1 na lista ordenada, e o melhor valor de aptidão recebe o último índice,  $M$ . Nessa abordagem, a esperança de seleção de cada indivíduo é baseada em seu posicionamento na lista ordenada, e não em seu valor de aptidão (MITCHELL, 1996). A definição do método começa pela associação de uma probabilidade de seleção de um item  $k$  da lista ordenada, dada pela fórmula (GLOVER e KOCHENBERGER, 2003):

$$P[k] = \alpha + \beta k; \quad (13)$$

onde:

$\alpha$ : constante definida pelo analista;

$\beta$ : constante definida pelo analista;

$k$ : índice da lista ordenada.

Existe uma formulação para definir os parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$  de acordo com a **pressão de seleção** (GLOVER e KOCHENBERGER, 2003). A formulação parte da premissa que o somatório da esperança de seleção de cada item da lista ordenada deve ser igual a 1. Como resultado as fórmulas abaixo (para seleção por **posicionamento linear**) foram definidas:

$$\beta = \frac{(\phi - 1)}{M(M - 1)}; \quad (14)$$

$$\alpha = \frac{2M - \phi(M + 1)}{M(M - 1)}; \quad (15)$$

onde:

$\phi$ : pressão de seleção, sendo  $1 \leq \phi \leq 2$ ;

$M$ : Tamanho da população;

$k$ : índice da lista ordenada;

A utilização de uma pressão de seleção de 1.1 foi testada em alguns trabalhos mostrando bons resultados (MITCHELL, 1996).

Uma questão importante sobre a seleção por posicionamento é a possibilidade de selecionar o indivíduo da posição  $k$  da lista ordenada, de uma forma bastante eficiente, através de uma equação quadrática (GLOVER e KOCHENBERGER, 2003):

$$k = \frac{-(2\alpha + \beta) \pm \sqrt{(2\alpha + \beta)^2 + 4\beta r}}{2\beta}; \quad (16)$$

onde:

$r$ : número aleatório uniforme gerado.

### 3.7.4 Seleção por torneio

Na seleção por torneio dois indivíduos são selecionados da população de forma aleatória. Um novo número aleatório  $r$  é gerado entre 0 e 1. Se  $r < k$ , sendo  $k$  um parâmetro, então o indivíduo com melhor valor de aptidão é selecionado, caso contrário o indivíduo com pior aptidão é selecionado (MITCHELL, 1996). Após o torneio, os dois indivíduos retornam a população para uma possível nova seleção.

A seleção por torneio pode ser utilizada mesmo quando a função de aptidão é totalmente subjetiva ou baseada em regras (GLOVER e KOCHENBERGER, 2003).

### 3.7.5 Seleção por dimensionamento Sigma

A seleção por dimensionamento Sigma é baseada no desvio padrão dos valores de aptidão de uma população. Indivíduos cujo valor de aptidão é inferior a  $c\sigma$  são descartados, sendo  $c$  um parâmetro entre 1 e 3 e  $\sigma$  o desvio padrão do valor de aptidão da população (OLIVEIRA, 2004).

O dimensionamento Sigma é dado pela formulação (MITCHELL, 1996):

$$ExpVal(k, t) = \begin{cases} 1 + \frac{f(k) - \bar{f}(t)}{2\sigma(t)}, & \text{se } \sigma(t) \neq 0; \\ 1.0 & , \text{se } \sigma(t) = 0; \end{cases} \quad (17)$$

onde:

$k$ : indivíduo da população;

$t$ : geração (instante);

$f(k)$ : aptidão do indivíduo  $k$ ;

$\bar{f}(t)$ : média dos valores de aptidão dos indivíduos na geração  $t$ ;

$\sigma$ : desvio padrão da aptidão dos indivíduos durante a geração  $t$ .

Indivíduos com a expectativa menor do que zero recebem um valor de 0.1 para que tivessem uma pequena chance de reproduzir-se (MITCHELL, 1996).

### 3.8 Outros operadores

Medeiros (2002) utiliza em seu trabalho um operador chamado **epidemia**. Segundo o autor, uma alta taxa de pressão seletiva tende a gerar perda de diversidade na população e consequente exploração excessiva de uma região de ótimo local. A epidemia aproveita a alta pressão seletiva do método de elitismo para evitar que regiões de ótimo local sejam excessivamente exploradas. O método consiste em destruir e recriar a população quando o **grau de evolução** da população permanece o mesmo por um determinado número de gerações. O grau de evolução é definido pelo autor como a quantidade de gerações em que a população apresenta o melhor indivíduo e, portanto, serviria como medida de diversificação na exploração do espaço de busca. Para não perder um indivíduo que pode ser um ótimo local ou mesmo um ótimo global, o método armazena o cromossomo do indivíduo mais apto, caso seu valor de aptidão seja maior que o do indivíduo previamente selecionado pela epidemia. O autor ainda sugere melhorias para o operador de epidemia que aproximem o operador de uma epidemia real, sugerindo questões como contaminação, por exemplo (MEDEIROS, 2002).

### 3.9 Critério de parada

Alguns critérios de parada são utilizados de forma alternativa ao número de gerações. Entre os critérios constam (GLOVER e KOCHENBERGER, 2003):

- a) Número de avaliações da função de aptidão;
- b) Tempo de processamento;
- c) Avaliação da diversidade populacional que pode ser baseada tanto nas variáveis de decisão quanto em sua representação, ou ainda nos valores das funções de aptidão da população.

### 3.10 Restrições de problemas de otimização

No processo de otimização é comum a utilização de restrições associadas aos problemas que são modelados. Nos AG, essas restrições não são um problema e existem algumas formas de modelá-las. Uma maneira seria garantir que todos os cromossomos gerados sejam válidos sob o ponto de vista do problema. Outra forma seria desenvolver um mecanismo de reparo, ou seja, um algoritmo que contenha regras para corrigir problemas na geração dos cromossomos. Uma terceira forma utilizada é penalizar cromossomos inválidos na função de aptidão, o que faria com que esses cromossomos não fossem selecionados ou mesmo utilizados na etapa de reprodução. Outra abordagem consiste em especializar os

operadores para que cromossomos gerados por eles sempre pertençam ao espaço de busca (MAN e KWONG, 1999).

### 3.11 Linhas gerais para sucesso de um AG

A manutenção da diversidade é peça chave para o sucesso de um AG. O efeito da seleção é reduzir a diversidade, e alguns métodos reduzem a diversidade de forma bem rápida. Aumentar o tamanho da população ou a taxa de mutação podem manter a diversidade. Outro método consiste em inibir a duplicidade de cromossomos na população, o que poderia gerar algum custo computacional em se tratando de populações grandes (GLOVER e KOCHENBERGER, 2003).

Hertz & Wildmer (2003) elencaram uma série de questões para a utilização de metaheurísticas na solução de problemas de otimização combinatória. São abordadas questões aplicadas tanto a metaheurísticas populacionais evolucionárias quanto a metaheurísticas baseadas em vizinhança. Segundo os autores, metaheurísticas populacionais precisam de pelo menos um operador que garanta a diversidade das soluções. O operador de mutação introduz alguma diversidade, porém de forma aleatória, e que uma boa abordagem para manter a diversidade poderia ser não permitir a entrada de soluções muito parecidas as já contidas em uma população (HERTZ e WILDMER, 2003).

Pham & Karaboga compilaram trabalhos sobre a parametrização dos AG. A tabela 2 foi adaptada para ilustrar alguns trabalhos e os parâmetros utilizados (PHAM e KARABOGA, 2000):

**Tabela 2: Valores de referência para parâmetros do AG**

Parâmetro de controle	De Jong (1975)	Grefenstette (1986)	Schaffer (1989)
Tamanho da população	50-100	30	20-30
Taxa de cruzamento	0.60	0.95	0.75-0.95
Taxa de mutação	0.001	0.01	0.005-0.01

Fonte: Adaptado de (PHAM e KARABOGA, 2000).

A despeito dos números encontrados pelos autores em seus trabalhos, é possível que estes parâmetros variem de acordo com o problema a ser resolvido pelo AG (DE JONG, 1975), (GREFENSTETTE, 1986), (SCHAFFER, CARUANA, *et al.*, 1989), (PHAM e KARABOGA, 2000).

Outro fator importante a ser considerado é o **Gerador de Números Aleatórios** (GNA) utilizado. Nem todos os GNA que integram as ferramentas de desenvolvimento são suficientemente bons, e podem afetar negativamente um AG quando empregados (GLOVER e KOCHENBERGER, 2003).

### 3.12 Utilização dos Algoritmos Genéticos em SEP

Oliveira (2004) definiu diversas metaheurísticas combinatórias para resolver o planejamento de expansão da transmissão em SEP. O problema de planejamento de expansão

foi avaliado ao longo prazo sob o ponto de vista estático utilizando uma versão paralela de *Simulated Annealing*, versões paralelas de AG e um time assíncrono, cujos agentes são variantes destas metaheurísticas. Segundo o autor, essas versões são inicializadas por um time assíncrono de algoritmos construtivos, e um ambiente de processamento distribuído é utilizado para os testes. Foram realizados testes em redes de teste, redes reais brasileiras de médio porte e um sistema colombiano de 93 barras e 155 ramos. Segundo o autor, a inicialização dos algoritmos com soluções factíveis determinadas por heurísticas, que consideram aspectos do problema, contribuem para um bom resultado das metaheurísticas (OLIVEIRA, 2004).

Panda & Padhy realizaram uma comparação entre um AG e uma técnica de **PSO** (*Particle Swarm Optimization*) para o problema de alocação de controladores **FACTS** (*Flexible AC Transmission Systems*). Um **TCSC** (*Thyristor controlled series compensator*) é um membro importante da família dos FACTS e serve para minimizar as oscilações em um SEP após algum distúrbio. Essas oscilações são refletidas no desvio da velocidade de rotação dos geradores. Neste trabalho, a integral do erro absoluto dos desvios de velocidade de rotação dos geradores foi utilizada como a função objetivo, e os parâmetros de um TCSC foram otimizados tanto pelo PSO quanto pelo AG. A performance dos métodos, em termos de tempo computacional e taxa de convergência, foi comparada. O PSO foi implementado através do pacote PSO toolbox, e o a AG através do pacote GAOT (*Genetic Algorithm Optimization Tool*). No AG, foi utilizada a seleção geométrica (um método de seleção por posicionamento baseado em uma distribuição geométrica normalizada) com cruzamento aritmético por interpolação e mutação não uniforme (Gaussiana). O tamanho da população do AG foi de 20. A busca foi rodada 20 vezes para cada algoritmo, e segundo o autor o PSO obteve resultados melhores que o AG em termos de aptidão média, pior aptidão e desvio padrão da aptidão. Os resultados finais foram parecidos, o PSO convergia em cerca de 10 gerações enquanto o AG convergia em aproximadamente 27. O tempo computacional utilizado no AG, entretanto, foi inferior ao tempo computacional utilizado pelo PSO a medida que as gerações avançavam (PANDA e PADHY, 2008).

Kumar e Mohan (2010) utilizaram uma abordagem multi-estágio para resolver o problema de **escalonamento de unidade** em uma primeira fase e as violações em linhas em uma segunda fase. O problema de escalonamento de unidade consiste em determinar o conjunto de unidades geradoras com vistas a minimizar o custo total de produção em um dado período de escalonamento. Na primeira fase um AG é utilizado para resolver o problema de escalonamento de unidades sem levar em consideração restrições de fluxo em linha. Na segunda fase, um AG, utilizando o FCDR para identificar as perdas de transmissão e os ângulos de fase do barramento de folga (*slack bus*) e das linhas, é executado para minimizar as perdas nas linhas. No AG da primeira fase diversas restrições do problema são levadas em consideração, como restrições de balanceamento de potência, reserva girante, custo de início e parada de geradores, limites de geração, entre outros. Todos os cromossomos gerados no AG da primeira fase são factíveis, seja através de correção ou de aproximação de valores, e uma população inicial de 500 indivíduos aleatórios é utilizada. Dois tipos de cruzamento são implementados utilizando **características inerentes ao problema**, com taxas de cruzamento de 70%. A mutação é utilizada e a seleção é feita por elitismo. O Segundo AG utiliza roleta na fase de seleção. São utilizados operadores de cruzamento e mutação, além de elitismo. A codificação consiste em concatenar as cadeias contendo a geração de potência ativa dos geradores (cada gene corresponde à potência ativa gerada por um gerador). O método foi testado em uma rede indiana com 12 geradores, 93 linhas e 66 barramentos e comparado a

outros dois algoritmos, incluindo outro AG. Segundo o autor o método obteve um bom desempenho nas comparações e mostrou-se confiável e robusto (KUMAR e MOHAN, 2010).

Ooka & Kamamura apresentam um **MIGA** (*Multi-Island Genetic Algorithm*) para obter a melhor combinação de capacidade dos equipamentos e o melhor plano de operação para resfriamento, aquecimento e consumo de energia em prédios. Um MIGA é um AG que divide a população de uma geração em “ilhas”, e os operadores são utilizados de forma independente em cada subpopulação, realizando trocas entre os indivíduos de cada subpopulação com vistas a manter a diversidade e evitar a convergência acelerada. Foi selecionado um esquema de equipamentos (quais equipamentos seriam utilizados) entre os diversos possíveis para os testes. Os testes procederam para encontrar a melhor combinação entre a capacidade dos equipamentos escolhidos e um plano de operação ao longo das 24 horas de um dia. Foram utilizados dois cromossomos separados, um para a capacidade dos equipamentos e outro para o plano de operação. Um coeficiente de operação, que consiste em uma função que determina a relação entre o consumo de energia de um equipamento e a energia entregue por ele, foi calculado por regressão numérica sobre dados reais publicados pela Associação dos Engenheiros de Aquecimento, Condicionamento de Ar e Saúde do Japão. Este coeficiente foi utilizado na função objetivo, e penalidades para ligar e desligar equipamentos em pequenos intervalos de tempo foi imposta. Os testes foram realizados para uma planta de um hospital de  $40.000m^2$  utilizando dados de consumo real de energia de um dia. Os resultados foram comparados com um **Método de Investigação Compreensiva** (que mede todas as possibilidades). Segundo o autor, o método encontrou soluções boas em um tempo computacional muito menor que o Método da Investigação Compreensiva. Os parâmetros do MIGA para o problema da seleção de capacidades foram um tamanho populacional de 10 em 2 ilhas através de 30 gerações, mantendo taxas de migração, crossover e mutação de 50%, 100% e 1%, respectivamente. Os parâmetros do MIGA para o problema do planejamento de operação foram um tamanho populacional de 24 em 3 ilhas através de 750 gerações, com as mesmas taxas (OOKA e KOMAMURA, 2009).

Dinu, Odagescu & Moise desenvolveram um AG para o problema do **Despacho Econômico-Ambiental Combinado**. O problema abordado consiste em atender uma determinada carga da forma mais econômica e minimizando a emissão de poluentes. Foi utilizado um AG com pesos aleatórios que são alterados durante a evolução do algoritmo: No início da busca os pesos servem para varrer de forma mais ampla o espaço de busca, e ao longo das gerações os pesos tornam o AG mais convergente em torno da população encontrada. Uma função objetivo total é formada a partir da soma de duas funções objetivo de custo de geração e custo de poluição. Uma codificação complexa baseada em **cromossomos diploides** foi utilizada juntamente com um operador de meiose e um novo operador de mutação para genes imaginários foi apresentado. A mutação **não uniforme** foi utilizada para o módulo de um argumento. O trabalho utilizou seleção por roleta seguida por um cruzamento aleatório para gerar as novas populações. Os parâmetros do AG foram uma população de 50 indivíduos, com um número de gerações igual a 1000, uma taxa de cruzamento de 80% e uma taxa de mutação de 3%. Segundo os autores, o uso de computação paralela e do novo operador de mutação ampliou a habilidade de busca local do método e tornou o método mais eficiente. Em comparação de 8 pontos de medida com outros 2 métodos, o método proposto foi superior em 4 pontos e ficou em segundo lugar em 3 pontos de comparação, tendo o pior desempenho em apenas 1 dos 8 pontos de comparação (DINU, ODAGESCU e MOISE, 2011).

Pezzini, Gomis-Bellmunt & Sudrià-Andreu apresentam um *survey* sobre técnicas de otimização para aumentar a eficiência energética em SEP. Dentre as diversas heurísticas

apresentadas nos trabalhos revisados pelos autores, constam 6 trabalhos utilizando AG. Uma comparação ente AG, Busca Tabu e *Simulated Annealing* mostrou que AG e Busca Tabu são mais rápidos para encontrar uma localização ótima para posicionamento de FACTS. Além disso, o artigo ressalta uma média de 5% de redução nas perdas utilizando AG, com valores parecidos para o perfil de tensão (PEZZINI, GOMIS-BELLMUNT e SUDRIÀ-ANDREU, 2011).

#### 4 AGFI e AGTn PARA SELEÇÃO DE CONTINGÊNCIAS

Conforme visto na seção sobre a Análise de Segurança em Redes Elétricas, a Análise de Contingências é uma etapa que testa uma lista preestabelecida de casos de contingências, simulando a falta do equipamento em questão e executando um fluxo de potência sobre a topologia alterada. Para cada simulação, o impacto provocado pela contingência no sistema elétrico é calculado, e ao final do teste de cada caso da lista de contingências, o programa indica se o sistema atende às restrições de segurança (MONTICELLI, 1983). A função da etapa de Seleção de Contingências é reduzir a lista de contingências a ser avaliada pela etapa de Análise de Contingências (GUERRA, 2002). Isto é necessário porque existem restrições de tempo impostas a esta tarefa, e por isso diversas técnicas foram desenvolvidas ao longo do tempo para ajudar nesta Seleção (EJEBE e WOLLENBURG, 1979), (CARPENTIER, 1993), (DEVARAJ, YEGNANARAYANA e RAMAR, 2002). Uma das técnicas desenvolvidas foi a classificação de contingências baseada na severidade de seus efeitos na tensão dos barramentos ou nos fluxos de linha através da análise de sensibilidade de um Índice de Performance, calculado após a simulação da contingência. Essa abordagem utilizava as equações para o fluxo de carga não-linear AC e o modelo simplificado de fluxo de carga DC (EJEBE e WOLLENBURG, 1979). Após a avaliação e classificação de cada contingência pelo método, as contingências eram ordenadas e apenas as mais severas eram avaliadas pelo Fluxo de Carga completo. Embora o método da classificação direta fosse eficiente, um de seus grandes problemas era o mascaramento, que consiste em atribuir um alto valor de Índice de Performance a contingências que causam algumas pequenas violações, ao invés de valorizar contingências que venham a causar grandes sobrecargas, ignorando assim casos realmente graves (CARPENTIER, 1993).

Conforme visto na seção sobre Algoritmos Genéticos, o espaço de busca pode ser entendido como um conjunto de hiperplanos de cromossomos que podem ser representados por esquemas, e os operadores genéticos evoluem uma ou mais populações de soluções fazendo com que diferentes esquemas compitam entre si, resolvendo vários hiperplanos em paralelo através de um paralelismo implícito (MAN e KWONG, 1999). Nims, El-Keib & Smith apresentaram uma abordagem para ordenação de contingências baseada em AG. De forma análoga, neste trabalho, o problema foi formulado como um problema de otimização e tratado utilizando-se AG. Naquele trabalho a severidade de uma contingência foi medida de acordo com o valor singular mínimo da Jacobiana de um Fluxo de Potência, pois o principal objetivo da utilização do AG era de reduzir a quantidade de casos analisados (NIMS, EL-KEIB e SMITH, 1997).

Neste trabalho o problema da Seleção de Contingências para a etapa de Análise de Segurança Estática em SEP será abordado. Tendo em vista a necessidade de manter um compromisso entre a eficiência e a eficácia da análise, o problema será tratado utilizando-se dois AG: O **Algoritmo Genético Para Seleção de Contingências por Critério de Violações de Fluxo de Potência Ativa (AGFI)**, e o **Algoritmo Genético Para Seleção de Contingências por Critério de Violações de Tensão nas Barras (AGTn)**.

Os dois AG utilizarão, como função de aptidão, Índices de Performance calculados sobre uma solução completa do Fluxo de Potência através do FCDR, aproximando este método de um método de triagem (*screening*) (CARPENTIER, 1993). Neste trabalho, o objetivo dos AG é encontrar, testando a menor quantidade de casos possíveis, as contingências simples ou múltiplas de linha mais severas sob o prisma dos dois Índices de Performance utilizados.

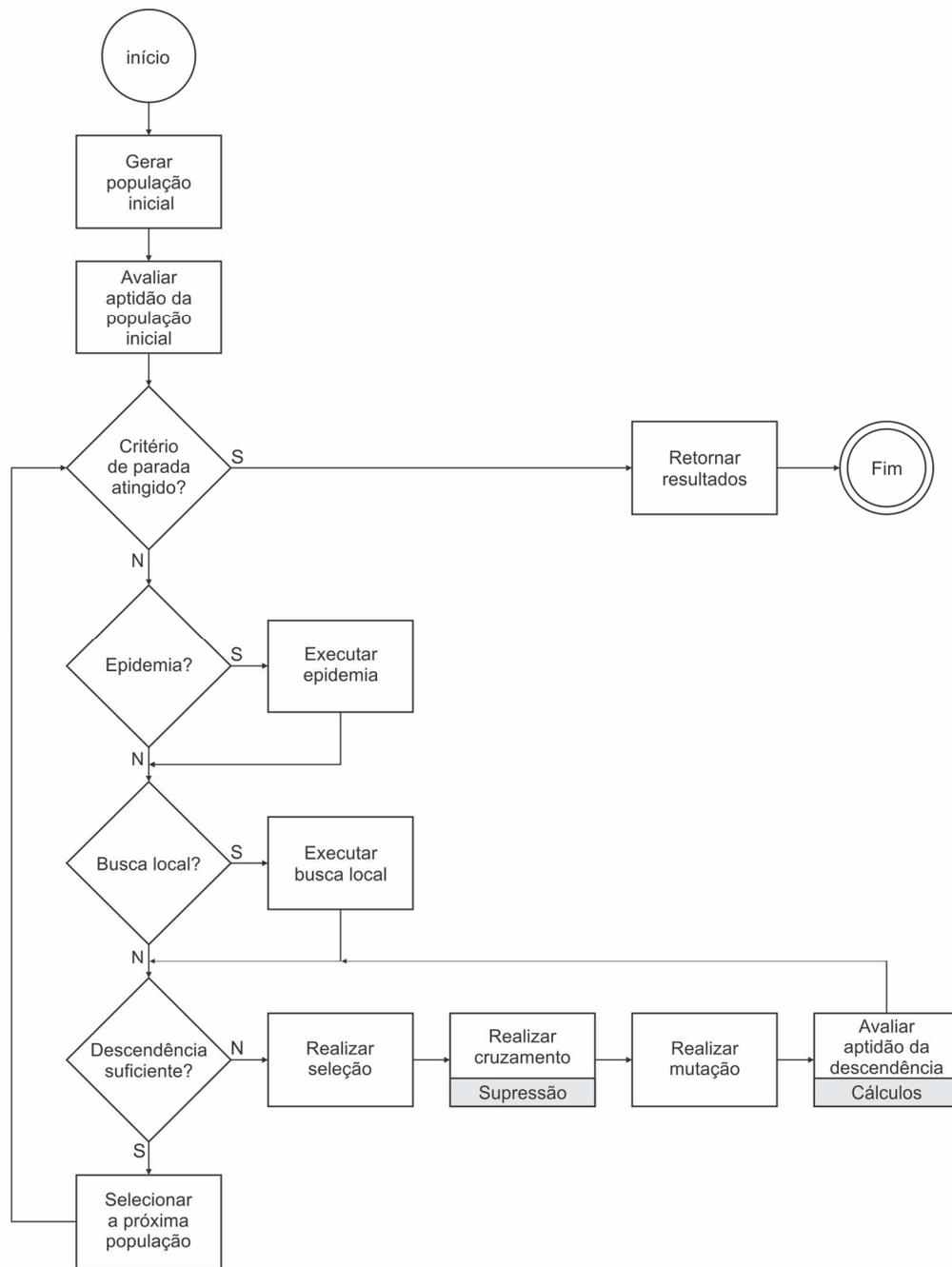
## 4.1 Funcionamento de AGFI e AGTn

O problema de Seleção de Contingências, conforme explicado anteriormente, pode ser definido como encontrar as contingências mais severas sob o ponto de vista de algum Índice de Performance. Para simular uma contingência é comum remover o equipamento contingenciado da lista de equipamentos pertencentes a uma rede para simular sua saída de operação. Essa é a forma como AGFI e AGTn trabalham: Cada indivíduo da população contém um identificador de quais ramos (linhas) compõem a contingência representada pelo indivíduo; Portanto, cada indivíduo da população representa uma possível contingência de **ordem  $k$** , sendo  $k$  a quantidade de ramos que saíram de operação devido a contingência.

Após os operadores de seleção, cruzamento e mutação, os indivíduos são avaliados. Na etapa de avaliação dos indivíduos, o FCDR é executado para calcular o Fluxo de Potência para a topologia pós-contingência, e então os Índices de Performance são calculados para obter o valor de aptidão de cada indivíduo. Os AG evoluem a população para resolver um problema de otimização que visa maximizar o valor dos Índices de Performance. Isto significa que, à medida em que os AG evoluem suas populações, indivíduos mais aptos (contingências mais graves) sobrevivem e cruzam-se entre si para encontrar contingências mais graves ainda. Ao fim do processo uma lista das contingências mais graves encontradas é então retornada, junto com uma lista de casos que não puderam ser avaliados por terem gerado desconexões, não convergências ou divergências no cálculo do FCDR.

A estrutura interna de AGFI e AGTn conta com os componentes padrão dos AG, acrescidos de mecanismos de reaproveitamento de cálculos, epidemia, supressão do espaço de buscas e busca local. O mecanismo de reaproveitamento de cálculos evita que o cálculo do FCDR seja executado mais de uma vez para a mesma contingência, e será explicado na subseção 4.1.2, juntamente com a Função de Aptidão. A epidemia, que será explicada na seção 4.1.8, é um operador que reinicia a busca dos AG caso o melhor indivíduo encontrado permaneça sendo o melhor indivíduo encontrado durante uma determinada quantidade de gerações. A supressão do espaço de buscas, que será explicada na seção 4.1.9, é um mecanismo que tem como objetivo evitar que os AG concentrem, de forma excessiva, sua busca no entorno de ótimos locais. A busca local, por sua vez, é um mecanismo que visa varrer mais detidamente regiões promissoras do espaço de buscas, e seu funcionamento será explicado na seção 4.1.10.

A figura 9 ilustra a estrutura interna e os componentes de AGFl e AGTn:



**Figura 9: Estrutura interna de AGFl e AGTn**

Fonte: Elaborado pelo autor.

O AGFl é o AG responsável por separar contingências graves sob o ponto de vista de violações de fluxo nos ramos, enquanto que o AGTn é o AG responsável por separar as contingências graves sob o ponto de vista de violações de tensão nas barras. Os AG rodam de forma separada, pois contingências graves sob o ponto de vista de fluxo não são necessariamente graves sob o ponto de vista de tensão, o que torna as populações distintas

durante a execução do AGFl e do AGTn. A única grande diferença entre a maneira como os AG implementados operam, é, portanto, a função de aptidão.

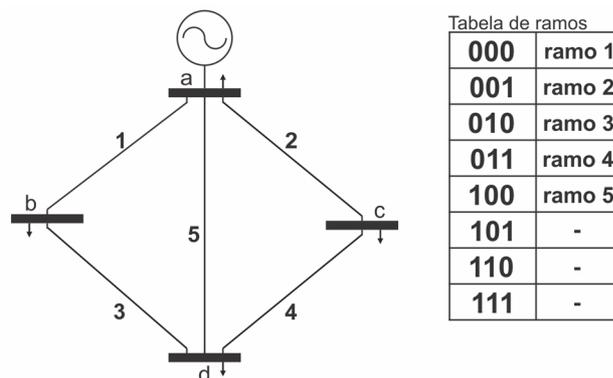
Nas próximas subseções são descritas as partes da estrutura interna e as decisões de projeto baseadas na literatura e empregadas na construção dos AGFl e AGTn.

#### 4.1.1 Codificação do cromossomo

A codificação escolhida para os AG é uma adaptação da codificação utilizada por Saitoh, Takano e Toyoda (1996).

Cada indivíduo em AGFl e AGTn representa uma possível contingência de ramo. A evolução dos AG é dada pelo cruzamento entre as contingências de ramo contidas na população, com o objetivo de encontrar contingências de ramo cada vez mais graves.

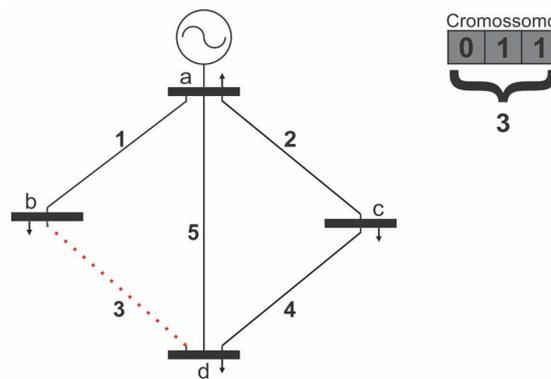
Inicialmente, todos os ramos da rede são lidos do arquivo, e uma tabela de ramos é montada. A tabela de ramos atribui um código binário a cada ramo da rede. A Figura 10 ilustra uma rede fictícia, composta por 4 barras e 5 ramos, seguida da tabela de ramos equivalente:



**Figura 10: Representação gráfica e tabela de ramos para uma rede fictícia de 4 barras**

Fonte: Elaborado pelo autor.

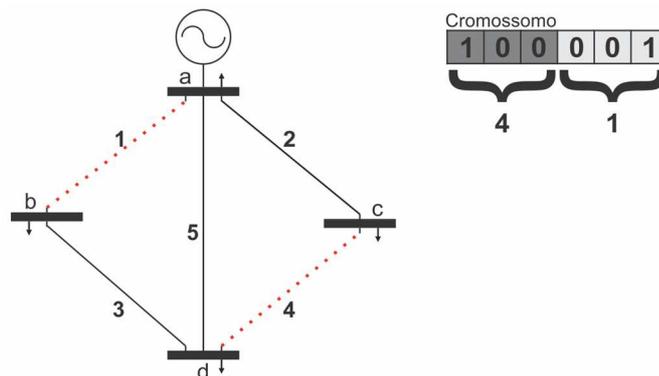
Os códigos binários da tabela de ramos são utilizados na formação dos cromossomos. Os cromossomos de indivíduos que representam contingências simples (de ordem  $k = 1$ ) são compostos pelo código binário do ramo contingenciado. A figura 11 ilustra uma contingência simples de ramo, seguida pelo cromossomo que a representa:



**Figura 11: Cromossomo que representa a contingência do ramo 3 na rede fictícia de 4 barras**

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os cromossomos que representam contingências múltiplas (ordem  $k \geq 2$ ) são compostos pela justaposição, dentro do cromossomo, dos códigos binários dos ramos contingenciados. A figura 12 ilustra uma contingência dupla, seguida do cromossomo que a representa:



**Figura 12: Cromossomo que representa a contingência dos ramos 4 e 1 na rede fictícia de 4 barras**

Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme ilustrado pela Figura 10, a quantidade de ramos existentes na rede é inferior ao número de posições disponíveis na tabela de ramos. Na rede fictícia de 4 barras, isto ocorre porque, para representar os 5 ramos existentes, utilizando a base binária, são necessários pelo menos 3 bits. Tendo em vista que é possível representar até 8 ramos utilizando 3 bits ( $2^3$  ramos), sobram 3 ( $8 - 5$ ) posições vazias na tabela de ramos (101, 110, 111).

Como a quantidade de ramos contidos em uma rede dificilmente será uma potência exata de dois, alguns cromossomos conterão códigos binários que apontarão para posições vazias da tabela de ramos. Esses cromossomos são descartados pelos operadores do AG, que os consideram cromossomos mal formados. Cromossomos de contingências de ordem  $k > 1$ , e que contenham mais de uma vez o mesmo ramo, também são descartados. Tendo em vista que o algoritmo de validação é invocado para cada cromossomo gerado, sua implementação é otimizada com vistas a não comprometer o desempenho dos AG.

Outra questão importante a ser observada sobre a codificação, é que uma mesma contingência de ordem  $k$ , tem  $k!$  possibilidades de representação binária, dado que um mesmo

ramo pode ocupar posições distintas dentro do cromossomo. A possibilidade da existência de mais de uma representação binária para o mesmo indivíduo exigiu alguns ajustes nos AG:

- a) A estrutura de reaproveitamento de cálculos considera como chave de consulta a contingência, e não sua representação binária, garantindo assim que a avaliação da função de aptidão para a mesma contingência seja executada apenas uma vez, a despeito da representação binária que a represente;
- b) Para garantir que qualquer codificação binária possa ser atingida pelo cruzamento, a população dos AG aceita cromossomos distintos que representem a mesma contingência;
- c) Assim como a estrutura de reaproveitamento de cálculos, a população de retorno (ver seção 4.1.3) também considera como chave de consulta a contingência em si, evitando, assim, que a lista final das contingências mais graves encontradas pelos AG contenha entradas repetidas;

Por questões de desempenho relativas à arquitetura dos processadores atualmente comercializados, os AGFl e AGTn tratam contingências de ordem  $k$  utilizando cromossomos inteiros de 64 *bits*. Tendo em vista que os cromossomos são formados por códigos binários que representam os ramos, a ordem máxima de uma contingência varia de acordo com a quantidade de ramos da rede. Uma rede com 1000 ramos, por exemplo, precisaria de 10 *bits* para representar um ramo, o que limita os AG a seleção de contingências de ordem  $k \leq 6$  para essa rede.

Embora codificação utilizada possua as limitações acima descritas, sua escolha foi baseada nos seguintes aspectos:

- a) Existe similaridade binária entre contingências que envolvam os mesmos ramos;
- b) Não restringir a representação múltipla de um mesmo indivíduo, permite que um indivíduo apto esteja presente mais de uma vez na população elite, além de possibilitar que os cruzamentos atinjam qualquer representação binária possível;
- c) O tamanho do cromossomo mantém-se fixo, a despeito do tamanho da rede;
- d) A utilização de inteiros de 64 *bits* para representar os cromossomos torna as operações de cruzamento e mutação muito eficientes sob o ponto de vista computacional;
- e) Embora a ordem das contingências seja limitada pelo tamanho do cromossomo, a utilização prática nos centros de controle dificilmente demandaria contingências de ordens muito elevadas (BALU, BERTRAM, *et al.*, 1992);

#### 4.1.2 Função de aptidão

A função de aptidão é baseada em um cálculo do Fluxo de Potência Desacoplado Rápido sobre a rede sem os ramos contingenciados. Após o cálculo, o Índice de Severidade associado ao AG em questão é calculado e atribuído como valor de aptidão do indivíduo. Nesta abordagem, os indivíduos mais aptos representam contingências mais graves.

O *ISfl* é um Índice de Performance utilizado pelo software ANAREDE® (CEPEL, 2004) para medir as violações de fluxo nos ramos da rede após a simulação de uma contingência. Sua formulação é baseada na potência aparente dos circuitos violados:

$$ISf = \sum_{l=1}^v \frac{MVA(l)^2}{CAP(l)^2} \quad (18)$$

onde:

$MVA(l)$ : maior fluxo de potência aparente do circuito  $l$ ;

$CAP(l)$ : capacidade do circuito  $l$  em MVA;

$v$ : número de circuitos violados;

$l$ : índice do circuito violado.

Neste trabalho será utilizada uma formulação parecida, entretanto baseada nas violações do fluxo de potência ativa dos ramos violados. O FCDR será utilizado para obter o cálculo do Fluxo de Potência. Este índice será denominado, ao longo do trabalho, como **Índice Genético de Severidade de Fluxo (ISGFl)**:

$$ISGFl = \sum_{l=1}^v \frac{pmw(l)^2}{cmw(l)^2}; \quad (19)$$

onde:

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

$cmw(l)$ : capacidade do circuito  $l$  em MW;

$v$ : número de circuitos violados;

$l$ : índice do circuito violado.

É importante salientar que  $ISGFl$  é baseado em violações de fluxo de potência ativa, enquanto que  $ISFl$  é baseado em violações de fluxo de potência aparente. Eles são diretamente proporcionais, mas são grandezas físicas distintas, e, portanto, seus valores absolutos **não devem ser comparados de forma direta**.

O Índice de Monitoração de Tensão ( $ISv$ ) é um Índice de Performance utilizado pelo *software* ANAREDE® para medir violações de tensão nos ramos da rede após a simulação de uma contingência:

$$VIOLt = \begin{cases} V(b) - V_{max}, & \text{se } V(b) > V_{max}; \\ V_{min} - V(b), & \text{se } V(b) < V_{min}; \end{cases} \quad (20)$$

$$ISv = \sum_{b=1}^n (VIOLt(b))^2 \times 10^4 \quad (21)$$

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 violadas;

$ISv$ : Índice de Monitoração de Tensão;

$l$ : índice da barra violada.

Neste trabalho a mesma formulação será utilizada, entretanto serão considerados valores de  $V_{min} = 0.95p.u.$  e  $V_{max} = 1.05p.u.$  Para a distinção entre os valores obtidos pelo ANAREDE® e pelo FCDR, o índice obtido pelo FCDR será chamado de **Índice Genético de Severidade de Tensão (ISGv)**.

Para o AGFI, o  $ISGFI$  é utilizado como valor de aptidão, enquanto que para o AGTn o  $ISGv$  é utilizado. Os resultados da avaliação da função de aptidão são armazenados em uma estrutura de dados em memória, evitando o cálculo do FCDR e do índice associado a um indivíduo já avaliado, independentemente de sua codificação. Mesmo que um indivíduo que simula uma contingência múltipla possa ser representado de diferentes formas, para a estrutura de reaproveitamento dos cálculos a contingência múltipla é a mesma. A estrutura de reaproveitamento cresce de acordo com o tamanho da rede e a ordem das contingências utilizadas pelo AG. Embora a estrutura de dados utilize alocação dinâmica de memória, em redes muito grandes, ou mesmo na seleção de contingências de ordens maiores, o armazenamento de todos os resultados já computados não é possível.

Tendo em vista que o cálculo do FCDR é o mesmo, independentemente do índice a ser obtido, e tendo em vista que a obtenção dos índices não demanda grande esforço computacional, sempre que um dos índices demanda o cálculo do FCDR o outro índice também é computado e armazenado na estrutura de memória, evitando um cálculo do FCDR.

#### 4.1.3 População e População de retorno

O problema da Seleção de Contingências consiste em definir uma lista de contingências graves para que uma análise, detida sobre esses casos, possa ser empregada (GUERRA, 2002). Para atender a este requisito, inicialmente definiu-se a população elite como sendo a lista de retorno dos AG. Tendo em vista a implementação do operador de epidemia, bem como a possibilidade de definir um tamanho da população elite menor para aumentar a diversidade populacional, foi introduzida uma população paralela contendo as contingências mais graves encontradas durante a execução dos AGFI e AGTn. Esta **população de retorno** é utilizada para a maioria das medições de eficácia dos AG implementados, porém não é utilizada para o processo evolutivo das buscas.

Conforme explicado na seção de codificação, é possível que uma mesma contingência seja representada por diferentes indivíduos. A população de trabalho dos AG permite que a mesma contingência esteja presente na população mais de uma vez através de diferentes representações, porém a população de retorno não permite isso. O objetivo é que a população de retorno tenha espaço para conter mais casos graves, enquanto que o cruzamento sobre indivíduos da população de trabalho possa alcançar qualquer contingência possível.

No mundo real, diversas contingências levariam a rede a situações muito graves como desconexões ou mesmo blecautes. Muitas dessas situações são mostradas através da impossibilidade de um cálculo de Fluxo de Potência, seja por desconexões, divergências ou mesmo pela não convergência do método utilizado para o cálculo do Fluxo de Potência. Tendo em vista que esses casos levam a não possibilidade do cálculo do Fluxo de Potência, eles são separados em listas e retornados após a execução dos AG, não fazendo parte do processo evolutivo da busca. O tratamento destes casos não é considerado neste trabalho, porém esse tratamento, na seção de conclusão, é citado como um provável trabalho futuro.

#### 4.1.4 Elitismo

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

#### 4.1.5 Seleção

Para o operador de seleção foi escolhida a seleção por posicionamento. (seção 3.7.3). Entretanto, foi criado um parâmetro nos AGFI e AGTn para indicar uma reserva de probabilidade, igualmente dividida entre os indivíduos da população. O intuito desta reserva de probabilidade é aumentar a chance de seleção destinada aos indivíduos menos aptos. Uma reserva de probabilidade de 20%, aplicada a uma população de 10 indivíduos, por exemplo, garantiria a cada indivíduo uma probabilidade de seleção inicial de 2%. Os 80% restantes seriam divididos entre os 10 indivíduos da população de acordo com sua posição em uma lista ordenada pelo valor de aptidão dos indivíduos. A Tabela 3 mostra a comparação, em uma população fictícia de 10 indivíduos, das probabilidades de seleção com e sem a utilização de uma reserva de probabilidade igualmente dividida de 20%:

**Tabela 3: Comparação das probabilidades de seleção com e sem reserva de probabilidade**

Posição	Cromossomo	Valor de aptidão	Probabilidade de seleção	
			Sem reserva	Com reserva de 20%
1	00100011	350	18,18%	16,55%
2	00101101	100	16,36%	15,09%
3	00111000	20	14,55%	13,64%
4	01000010	15	12,73%	12,18%
5	01001100	8	10,91%	10,73%
6	01010110	5	9,09%	9,27%
7	01100000	4	7,27%	7,82%
8	01101010	3	5,45%	6,36%
9	01110100	3	3,64%	4,91%
10	01111110	2	1,82%	3,45%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para definir a probabilidade de seleção de cada posição da lista ordenada, a equação (22) é utilizada:

$$pst(p) = \frac{psi}{tpp} + \left( (1 - psi) * \frac{(tpp + 1) - p}{\sum_{i=1}^{tpp} i} \right); \quad (22)$$

onde:

$pst(p)$ : probabilidade de seleção total da posição  $p$ ;

$tpp$ : tamanho da população;

$psi$ : probabilidade de seleção igualmente dividida;

$p$ : posição do indivíduo na lista ordenada, variando de 1 a  $tpp$ ;

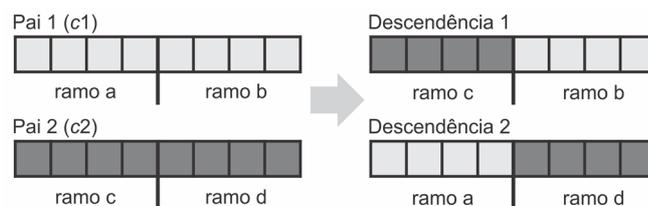
$i$ : índice que assume cada uma das posições da lista ordenada

#### 4.1.6 Cruzamento

Tanto AGFI quanto AGTn utilizam dois tipos de cruzamento: O cruzamento de pontos múltiplos (ver seção 3.6.1) e o **cruzamento por troca de ramos**.

Para o cruzamento de pontos múltiplos, que é utilizado tanto em contingências simples quanto em contingências múltiplas, a quantidade de pontos de corte foi definida entre  $k$  e  $3k$ , sendo  $k$  a ordem das contingências. Para uma seleção de contingências utilizando ordem  $k = 2$ , por exemplo, os cruzamentos de pontos múltiplos ocorrem utilizando entre 2 e 6 pontos de corte.

Em alguns trabalhos, para problemas especiais, operadores específicos são desenvolvidos ou utilizados (MAN e KWONG, 1999). Neste trabalho foi utilizado um operador de cruzamento específico para o cruzamento de contingências múltiplas. O cruzamento por troca de ramos pode ser entendido como um cruzamento de pontos múltiplos onde os pontos de corte são os *bits* limite, ou seja, os *bits* que separam os ramos dentro do cromossomo. Desta forma, quando aplicado, um dado ramo  $a$  de um cromossomo  $c1$  é trocado com um dado ramo  $c$  de um cromossomo  $c2$ , gerando um terceiro cromossomo que contém um ramo de  $c1$  e um ramo de  $c2$ . A figura 13 ilustra a operação de cruzamento por troca de ramo:



**Figura 13: Cruzamento por troca de ramos**

Fonte: Elaborado pelo autor.

Esta operação de cruzamento pode ser vista como uma forma de intensificação, tendo em vista que os novos indivíduos gerados contém ramos dos dois indivíduos pais, o que dificilmente ocorre no cruzamento por pontos de corte, onde as operações binárias geralmente conduzem a novos ramos.

Para otimizar o desempenho dos AG, todas as máscaras possíveis para cruzamento por ponto de corte ou por troca de ramos são previamente computadas, e o sorteio de um número aleatório seguido de operações binárias cruzam os cromossomos de forma eficiente. Esta abordagem pode ser considerada uma mescla entre o cruzamento de pontos múltiplos e o cruzamento uniforme. Embora a política de troca de *bits* seja baseada no cruzamento de pontos múltiplos, com vistas a manter blocos, as máscaras previamente computadas são armazenadas e aplicadas da mesma maneira que no cruzamento uniforme, evitando assim o sorteio de mais de um número aleatório por cruzamento. Esta abordagem foi utilizada para obter a eficiência computacional do cruzamento uniforme mantendo a eficácia do cruzamento de pontos múltiplos em garantir a diversidade sem destruir blocos (MAN e KWONG, 1999).

#### 4.1.7 Mutação

A mutação foi implementada utilizando-se máscaras de inversão de um *bit*. Nesta implementação, as máscaras binárias de inversão de um *bit* são computadas e tabuladas no início do algoritmo. Um número aleatório é sorteado e determina se a mutação será ou não realizada. Após a decisão pela mutação, um novo número aleatório é gerado para definir o índice da tabela de máscaras de mutação a ser utilizado na mutação. Esta forma de aplicar a mutação é utilizada tanto em AGFl quanto em AGTn.

A taxa de mutação é fixa, porém ela pode ser aumentada automaticamente caso os AG encontrem dificuldades em gerar os indivíduos da próxima geração. Isto pode ocorrer quando a população é pequena e os AG convergem: Como os indivíduos são poucos e os cromossomos são parecidos, os cruzamentos podem ter dificuldade em gerar novos indivíduos, principalmente quando são utilizadas altas taxas de cruzamento por troca de ramos.

Caso os AG fiquem por  $8tpp$  (sendo  $tpp$  o tamanho da população) iterações sem conseguir gerar os indivíduos necessários para a próxima população, a taxa de mutação é incrementada em 1%. Quando a próxima geração é obtida, a taxa de mutação volta ao valor original da parametrização.

#### 4.1.8 Epidemia

Para o critério de execução da epidemia foi estabelecido o número máximo de gerações onde um determinado indivíduo é o melhor indivíduo da população. Atendido esse limite, toda a população é destruída e uma nova população é criada aleatoriamente. Tendo em vista a utilização de uma população de retorno, é garantido que soluções boas encontradas anteriormente não sejam perdidas, embora não existam garantias de que bons indivíduos encontrados anteriormente retornem à busca.

#### 4.1.9 Supressão do espaço de buscas

Em (SAITOH, TAKANO e TOYODA, 1996) foi utilizada uma abordagem de supressão do espaço de buscas baseada no Teorema do Esquema (ver seção 3.3). Naquele trabalho, as características dos cromossomos de uma população eram extraídas e a supressão do espaço de buscas funcionava atribuindo um baixo valor de aptidão a cromossomos que pudessem ser representados pelo esquema extraído.

Neste trabalho, a ideia de evitar espaços de busca saturados foi desenvolvida evitando-se que cromossomos contendo determinados ramos fossem gerados quando uma parte dos cromossomos da população de elite apresentasse, durante uma determinada quantidade de gerações, algum ramo específico. Este mecanismo foi inspirado na lista Tabu utilizada pela metaheurística Busca Tabu (GLOVER e KOCHENBERGER, 2003).

Ao fim de cada geração são contados os cromossomos que utilizam cada ramo, e, caso a quantidade de indivíduos ultrapasse um parâmetro, a geração é considerada “contaminada” por cromossomos (e soluções) que tenham aquele ramo. Se a população permanecer “contaminada” pelo mesmo ramo por um determinado número de gerações, indivíduos resultantes de cruzamentos que contiverem em seus ramos o ramo “contaminante” são sumariamente descartados. O descarte dos cromossomos contaminados ocorrerá durante um número de gerações parametrizado. Após o término do período de supressão, o ramo poderá ser utilizado em novos cromossomos.

#### 4.1.10 Busca local

Uma busca local consiste na realização de perturbações que gerem soluções factíveis em alguma vizinhança do espaço de buscas, com o intuito de melhorar a qualidade das soluções encontradas (PAPADIMITRIOU e KENETH, 1998).

Foi implementado em AGFI e AGTn um mecanismo de busca local, onde são gerados cruzamentos por troca de ramos entre os melhores indivíduos da população, até que uma determinada quantidade de cromossomos seja gerada pela busca local. Após a geração dos indivíduos, eles são ordenados pelos seus respectivos valores de aptidão, e os melhores são inseridos na população da próxima geração. A busca local ocorre em um intervalo de gerações previamente parametrizado. Também são parâmetros a quantidade de indivíduos gerados e a quantidade dos melhores, entre os gerados, que serão aproveitados para a próxima geração. Estes parâmetros são escolhidos visando evitar a convergência prematura da população.

## 4.2 Parâmetros dos AGFI e AGTn

Abaixo são explicados os parâmetros utilizados em AGFI e AGTn. Os parâmetros são divididos em parâmetros gerais, de epidemia, de supressão do espaço de buscas e parâmetros da busca local.

#### 4.2.1 Parâmetros gerais

Nesta categoria estão contidos os parâmetros clássicos dos AG, bem como parâmetros referentes ao elitismo e à lista de contingências do problema abordado. Abaixo são explicados os parâmetros desta categoria:

- a) Tamanho da população (*tpp*): Define o tamanho da população do AG;
- b) Tamanho da população elite (*tpe*): Define o tamanho da população elite, ou seja, a quantidade dos melhores indivíduos a ser preservada para a próxima geração;
- c) Tamanho da lista de retorno (*tlr*): Define o tamanho da lista de retorno. É um parâmetro intrínseco ao problema da Seleção de Contingências, e determina quantas das contingências mais graves encontradas serão retornadas ao fim da execução dos AG.
- d) Número de gerações (*nge*): Define a quantidade máxima de gerações utilizadas no critério de parada do AG;
- e) Frequência de cruzamento (*fcr*): Define a probabilidade de que um cruzamento seja realizado após a seleção do indivíduo;
- f) Frequência de cruzamento por pontos de corte (*fpc*): Define a probabilidade de que o cruzamento aplicado seja o cruzamento de pontos múltiplos;
- g) Frequência de cruzamento por troca de ramos (*ftr*): Define a probabilidade de que o cruzamento aplicado seja o cruzamento por troca de ramos. Esse parâmetro varia de acordo com *fpc*, sendo obtido através da equação  $ftr = 1 - fpc$ ;
- h) Taxa de mutação (*tmt*): Define a probabilidade de mutação utilizada pelo AG;
- i) Probabilidade de seleção igualmente dividida (*psi*): Define uma reserva de probabilidade de seleção que será dividida igualmente entre todos os indivíduos da população;

#### 4.2.2 Parâmetros da epidemia

Nesta categoria estão contidos os parâmetros referentes ao operador de epidemia. Abaixo são explicados os parâmetros desta categoria:

- a) Usar epidemia (*uep*): Define se a epidemia será ou não utilizada;
- b) Gerações sem melhora para ativar a epidemia (*gsa*): Define o número de gerações limite sem encontrar um indivíduo mais apto. Ao atingir *gsa* gerações sem encontrar um indivíduo mais apto, a epidemia é ativada, eliminando e recriando toda a população de forma aleatória.

### 4.2.3 Parâmetros da supressão do espaço de buscas

Nesta categoria estão contidos os parâmetros referentes ao operador de supressão do espaço de buscas. Abaixo são explicados os parâmetros desta categoria:

- a) Usar supressão (*usp*): Define se a supressão será ou não utilizada;
- b) Contaminação (*cnt*): Define quantos indivíduos da população elite devem conter um mesmo ramo para considerar a população elite pouco diversificada;
- c) Gerações sem melhora para ativar a supressão (*gss*): Define o limite de gerações em que um determinado ramo pode contaminar a população elite antes de ativar a supressão;
- d) Gerações na lista de supressão (*ges*): Define o número de gerações em que um determinado ramo constará na lista de supressão;

### 4.2.4 Parâmetros da busca local

Nesta categoria estão contidos os parâmetros referentes à rotina de busca local. Abaixo são explicados os parâmetros desta categoria:

- a) Usar busca local (*usb*): Define se a busca local será ou não utilizada;
- b) Intervalo da busca local (*ibl*): Define o número de gerações até que uma nova busca local ocorra;
- c) Indivíduos gerados pela busca local (*igb*): Define a quantidade de indivíduos que serão gerados a cada execução da busca local;
- d) Indivíduos inseridos na população (*iip*): Define quantos dos melhores indivíduos gerados pela busca local serão inseridos na população da próxima geração;

## 5 METODOLOGIA

Neste trabalho, AGFl e AGTn serão testados em duas redes distintas: A rede IEEE30 e uma rede real de 810 barras e 1340 ramos. Para ambas as redes serão testadas contingências de ramo de ordem  $k = 2$ . Contingências de ramo de ordem  $k = 1$  serão testadas apenas para a rede IEEE30, com vistas a fornecer dados comparativos para trabalhos futuros.

### 5.1 Metodologia de averiguação da eficácia do método

Para testar a eficácia dos AGFl e AGTn, todas as contingências duplas de ramos serão simuladas via método clássico e sua severidade será tabulada.

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).

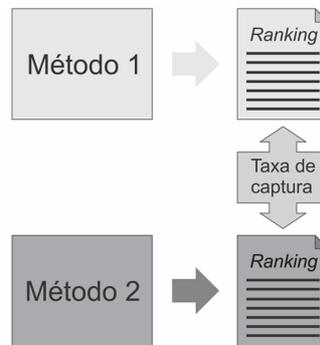
Após a execução do método clássico, as contingências serão ordenadas e uma lista das contingências mais graves, segundo cada índice, será apresentada. Tendo em vista que muitas contingências levam a casos que impedem o cálculo do Fluxo de Potência (divergência, desconexão e não convergência) esses casos não participam da lista de contingências graves, para efeitos de comparação. Atualmente, conforme explicado na seção anterior, estes casos são separados pelos AG quando encontrados, e ao fim do processo eles são retornados em forma de lista, para tratamento computacional por algum outro método.

Para averiguar a eficácia do AGFl em selecionar contingências graves, sob o ponto de vista de violações de fluxo de potência ativa nos ramos, a lista de contingências severas retornadas pelo AGFl será comparada, através da taxa de captura, à lista de contingências severas obtidas pelo método clássico. Para averiguar a eficácia do AGTn em selecionar contingências graves sob o ponto de vista de violações de tensão nas barras, a lista de contingências severas retornadas pelo AGTn será comparada, através da taxa de captura, à lista de contingências severas obtidas pelo método clássico.

#### 5.1.1 Taxa de captura

A **taxa de captura** ( $tcr$ ) é um escalar que mede o quanto um método de seleção é efetivo em retornar as contingências mais severas. Para obter a taxa de captura, a lista de contingências mais severas retornadas pelo método avaliado é comparada a lista das contingências mais severas segundo o método exaustivo. (QUINTELA, 2002), (ALBUQUERQUE, 2005).

A figura 14 ilustra o processo de obtenção da taxa de captura:



**Figura 14: Comparação de métodos de seleção de contingências**

Fonte: Elaborado pelo autor.

A formulação da taxa de captura é apresentada pela equação (23):

$$tcr = \frac{K(P)}{N} \times 100; \quad (23)$$

onde:

*tcr*: Taxa de captura;

*N*: quantidade de contingências severas que desejamos capturar;

*P*: posições tomadas da lista de contingências classificadas pelo método;

*K*: contingências severas que aparecem nas *P* posições iniciais da lista.

Para a rede IEEE30, o método clássico utilizará os índices *ISfl* e *ISv* do ANAREDE®, sobre um cálculo do Fluxo de Potência pelo método de Newton.

Para a rede real de 810 barras e 1340 ramos, o método clássico utilizará os índices *ISGfl* e *ISGv* sobre uma execução completa do FCDR para o cálculo do Fluxo de Potência, tendo em vista que ele é um método mais eficiente para este fim (STOTT e ALSAC, 1973).

### 5.1.2 Percentual do espaço de busca

Neste trabalho o problema de Seleção de Contingências é abordado como um problema de otimização combinatória, e, portanto, o número de casos possíveis pode ser previamente calculado. Isso permite uma análise do percentual do espaço de busca que foi varrido pelos AG. Esta análise torna-se importante tendo em vista que, embora o FCDR seja uma forma eficiente de calcular o Fluxo de Potência, ele demanda certo esforço computacional, tornando-se importante executá-lo o mínimo de vezes possível. Quanto menor

o percentual do espaço de busca varrido, menos execuções do FCDR serão necessárias, o que tornará os AG mais eficientes.

Para obter o percentual do espaço de busca, foi desenvolvida uma estrutura auxiliar de memória que contabiliza quantos indivíduos distintos foram avaliados ao longo de cada geração do AG. O percentual é então obtido através da equação (24):

$$peb = \frac{qia(g)}{C_k^r}; \quad (24)$$

onde:

*peb*: percentual do espaço de busca;

*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.

### 5.1.3 Tempo de execução

O tempo de execução é medido em 10 amostras independentes, utilizando sementes aleatórias distintas. A média e o desvio padrão são calculados e apresentados.

## 5.2 Metodologia dos testes das parametrizações dos AG

Para efeitos de simplificação do texto, será denominado de parametrização o conjunto dos valores de todos os parâmetros utilizados pelos AG em uma dada rodada *r*.

A definição dos parâmetros para os testes na rede IEEE30 em contingências de ordem  $k = 1$  foi feita através de testes manuais. Já para os parâmetros em contingências de ordem  $k = 2$ , tanto na rede IEEE30 quanto na rede real, foi realizada uma bateria de testes composta pelas seguintes etapas:

- a) Definir parâmetros de população e probabilidades dos operadores: Esta etapa objetiva identificar os tamanhos de população e população elite, bem como as probabilidades associadas à seleção, cruzamento e mutação que obtenham uma boa taxa média de captura.
- b) Definir parâmetros de epidemia, supressão e busca local: Esta etapa tem por objetivo encontrar parâmetros que possam guiar os AG a encontrarem boas soluções em subespaços de busca promissores, bem como demovê-los de subespaços de busca pouco promissores e/ou saturados.

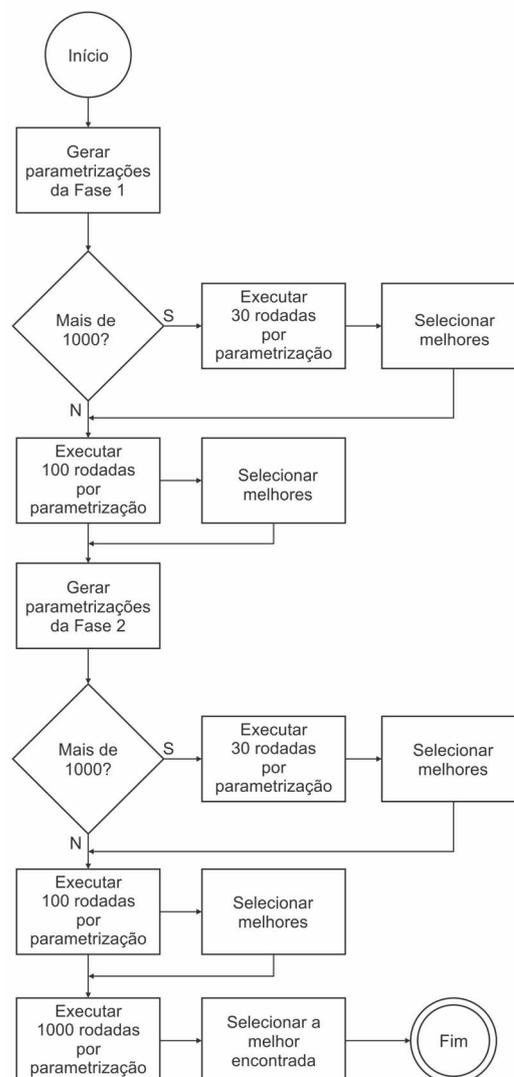
Para evitar que parametrizações sejam “beneficiadas”, o mesmo conjunto de sementes aleatórias foi utilizado para cada parametrização testada. Isso garante que parametrizações distintas e que tenham o mesmo tamanho de população partam da mesma população inicial.

As sementes foram previamente geradas em arquivos contendo 30, 100 e 1000 conjuntos de sementes aleatórias compostas por números primos.

Quando as combinações dos parâmetros geravam uma quantidade muito grande de parametrizações a serem testadas, primeiramente a taxa média de captura de 30 execuções dos AG era obtida. As melhores parametrizações segundo este filtro inicial eram separadas para a obtenção da taxa média de captura de 100 execuções. Quando a quantidade de combinações de parâmetros a ser testada era menor, partiu-se direto de 100 amostras.

Num segundo momento, após uma avaliação das taxas de captura obtidas pelas parametrizações, um novo e pequeno conjunto com as melhores parametrizações foi escolhido para mais testes, desta vez com 1000 execuções.

Ao fim dos testes, a melhor parametrização encontrada é separada para a geração dos dados da execução dos AG. A figura 15 ilustra os passos do processo:



**Figura 15: Metodologia de seleção de parâmetros para ordem  $k = 2$**

Fonte: Elaborado pelo autor.

Como critério de desempate entre parametrizações que obtiveram taxas de captura parecidas, foi utilizada uma tabela que atribui pesos às contingências da lista de comparação conforme sua ordem no *ranking* de gravidade do método clássico. Os pesos são especialmente úteis para identificar, entre parametrizações com taxas de captura parecidas, aquelas que obtêm mais vezes o caso mais grave. Na tabela 4 constam, a título de exemplo, os pesos utilizados para a rede IEEE30:

**Tabela 4: Tabela de pesos para contingências graves na rede IEEE30**

<b>Posição</b>	<b>Peso</b>
1	25
2	20
3	15
4	10
5	5

Fonte: Elaborado pelo autor.

Após os testes de parametrização, a melhor parametrização encontrada foi então escolhida para a etapa de testes dos AGFl e AGTn.

## 6 TESTES E RESULTADOS NA REDE IEEE30

### 6.1 Características da rede IEEE30

Na rede IEEE30 existem 30 barras e 41 ramos. Nesta configuração de rede, são possíveis 41 contingências de ramo de ordem  $k = 1$  e 820 contingências de ramo de ordem  $k = 2$  (a combinação de 41 ramos tomados 2 a 2). Foram calculados e tabulados os Índices de Performance segundo o ANAREDE® (*ISfl* e *ISv*) (CEPEL, 2004), e foram calculados e tabulados os Índices de Performance (*ISGFl* e *ISGTn*) sobre execuções do FCDR (STOTT e ALSAC, 1973) para todas as contingências de ordem  $k = \{1, 2\}$ .

É importante salientar que *ISGFl* é baseado em violações de Fluxo de Potência Ativa, enquanto que *ISfl* é baseado em violações de Fluxo de Potência Aparente. Eles são diretamente proporcionais, mas são grandezas físicas distintas, e, portanto, seus valores absolutos **não devem ser comparados de forma direta**.

Na tabela 5 constam as 5 contingência mais graves segundo *ISfl* e seu posicionamento no *ranking* conforme *ISGFl*:

**Tabela 5: 5 contingências de ordem  $k = 1$  mais graves segundo *ISfl* - IEEE30**

Caso		ANAREDE®		FCDR	
Barra origem	Barra destino	Ranking	ISfl	Ranking	ISGFl
2	5	1	12,9	2	9,277098
1	3	2	11,9	3	9,277098
3	4	3	11,6	4	9,090715
27	28	4	11,3	6	5,562006
4	12	5	10,6	5	7,882533

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao avaliar a tabela acima é possível notar que 4 das 5 contingências mais graves segundo o *ISfl* estão contidas nas 5 contingências mais graves segundo *ISGFl*. Para entender por que a contingência mais grave segundo *ISGFl* não consta na tabela 6, são listadas, na tabela 6, as 5 contingências mais graves segundo *ISGFl*, seguidas por seu *ranking* segundo *ISfl*:

**Tabela 6: 5 contingências de ordem  $k = 1$  mais graves segundo *ISGFI* - IEEEE30**

Caso		FCDR		ANAREDE®	
Barra origem	Barra destino	Ranking	ISGFI	Ranking	ISFI
1	2	1	12,8726	NC	NC
2	5	2	9,6646	1	12,9
1	3	3	9,2770	2	11,9
3	4	4	9,0907	3	11,6
4	12	5	7,8825	5	10,6

Fonte: Elaborado pelo autor.

A tabela 6 mostra que a contingência mais grave segundo *ISGFI* incorre em uma Não Convergência do cálculo do fluxo de potência no ANAREDE®. Uma não convergência do Fluxo de Potência, invariavelmente, denota um caso grave (MONTICELLI, 1983). É possível notar uma grande similaridade entre o *ranking* de gravidade segundo *ISGFI* e o *ranking* de gravidade segundo *ISFI*. Nos dois casos, 4 das 5 (80%) mais graves estão diretamente relacionadas nas tabelas, e, se a não convergência for considerada mais grave que qualquer índice, essa razão aumenta para 5 das 6 (83%).

As contingências mais graves, sob o ponto de vista de violações de tensão, também foram obtidas. Na tabela 7 constam as 3 contingências mais graves sob o ponto de vista de *ISv*, e seu *ranking* segundo *ISGv*:

**Tabela 7: 3 contingências de ordem  $k = 1$  mais graves segundo *ISv* - IEEEE30**

Caso		ANAREDE®		FCDR	
Barra origem	Barra destino	Ranking	ISv	Ranking	ISGv
27	28	1	400,5	1	2455,2724
27	30	2	60,8	2	686,3265
27	29	3	4,3	3	540,1858

Fonte: Elaborado pelo autor.

Apenas 3 contingências foram listadas como graves pelo ANAREDE®. As 3 contingências classificadas como graves pelo ANAREDE® também foram classificadas como graves pelo *ISGv*, ocupando exatamente as mesmas posições no *ranking*.

Para as contingências de ordem  $k = 2$  também foram enumerados e comparados os casos mais graves. A tabela 8 contém as 5 contingências mais graves sob o ponto de vista de violações de fluxo segundo *ISFI* e *ISGFI*:

Tabela 8: 5 contingências de ordem  $k = 2$  mais graves segundo *ISfl* - IEEE30

Caso				ANAREDE®		FCDR	
Ramo 1		Ramo 2		Ranking	ISfl	Ranking	ISGFI
Barra origem	Barra destino	Barra origem	Barra destino				
9	10	4	12	1	30,2	1	22,6533
2	5	4	6	2	25,7	2	21,8283
4	12	10	17	3	23,6	4	19,9234
4	12	27	28	4	23,1	8	17,9991
6	9	4	12	5	22,8	3	20,3017

Fonte: Elaborado pelo autor.

A tabela 8 mostra que 4 das 5 (80%) contingências mais graves encontradas por *ISfl* também foram encontradas na lista das 5 mais graves segundo *ISGFI*. A comparação partindo de *ISGFI* pode ser vista na tabela 9:

Tabela 9: 5 contingências de ordem  $k = 2$  mais graves segundo *ISGFI* - IEEE30

Caso				FCDR		ANAREDE®	
Ramo 1		Ramo 2		Ranking	ISGFI	Ranking	ISFI
Barra origem	Barra destino	Barra origem	Barra destino				
9	10	4	12	1	22,6533	1	30,2
2	5	4	6	2	21,8283	2	25,7
6	9	4	12	3	20,3017	5	22,8
4	12	10	17	4	19,9234	3	23,6
1	3	2	5	5	18,9124	6	22,1

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao analisar a tabela 9 é visto que, também nesse caso, 4 das 5 (80%) contingências mais graves encontradas por *ISGFI* estão na lista das 5 mais graves segundo *ISfl*.

Procedendo a análise, foram tabuladas e comparadas as 5 contingências mais graves segundo *ISv* e *ISGv*, para a ordem  $k = 2$ . Na tabela 10 constam as 5 contingências mais graves segundo *ISv* e sua comparação com *ISGv*:

Tabela 10: 5 contingências de ordem  $k = 2$  mais graves segundo  $ISv$  - IEEE30

Caso				ANAREDE®		FCDR	
Ramo 1		Ramo 2		Ranking	ISv	Ranking	ISGv
Barra origem	Barra destino	Barra origem	Barra destino				
10	21	27	28	1	1471,10	2	4564,53
12	15	27	28	2	1044,00	3	4036,24
6	9	27	28	3	753,90	4	3358,76
2	5	27	28	4	625,80	11	2617,79
21	22	27	28	5	587,70	6	3066,45

Fonte: Elaborado pelo autor.

A tabela 10 mostra que 3 das 5 (60%) contingências mais graves segundo  $ISv$  estão na lista das 5 mais graves segundo  $ISGv$ . Para entender melhor esses valores, faz-se imprescindível a análise da tabela 11:

Tabela 11: 5 contingências de ordem  $k = 2$  mais graves segundo  $ISGv$  - IEEE30

Caso				FCDR		ANAREDE®	
Ramo 1		Ramo 2		Ranking	ISGv	Ranking	ISv
Barra origem	Barra destino	Barra origem	Barra destino				
23	24	27	28	1	6282,06	NC	NC
10	21	27	28	2	4564,53	1	1471,10
12	15	27	28	3	4036,24	2	1044,00
6	9	27	28	4	3358,76	3	753,90
1	2	27	28	5	3188,22	NC	NC

Fonte: Elaborado pelo autor.

A tabela 11 mostra que 3 das 5 (60%) contingências mais graves segundo  $ISGv$  estão na lista das 5 mais graves segundo  $ISv$ . Porém cabe avaliar que as outras duas contingências mais graves segundo  $ISGv$  levam a uma não convergência do cálculo do Fluxo de Potência no ANAREDE®, o que denota serem, segundo o ANAREDE®, casos graves.

Após uma análise preliminar sobre as tabelas acima, é possível intuitivamente encontrar correlação entre  $ISFl$  e  $ISGFl$ , bem como entre  $ISv$  e  $ISGv$ . Porém uma análise de correlação foi realizada para garantir que a afirmação é verdadeira para a rede IEEE30.

A análise de correlação partiu dos valores encontrados por  $ISfl$  e  $ISv$ . Os casos de desconexão e de não convergência foram eliminados das amostras, pois todos os casos onde o FCDR não obteve o Fluxo de Potência também não puderam ter o Fluxo de Potência obtido pelo ANAREDE®. Considerando  $k = 1$ , sobraram 37 casos para a comparação, enquanto que para  $k = 2$  restaram 643 casos.

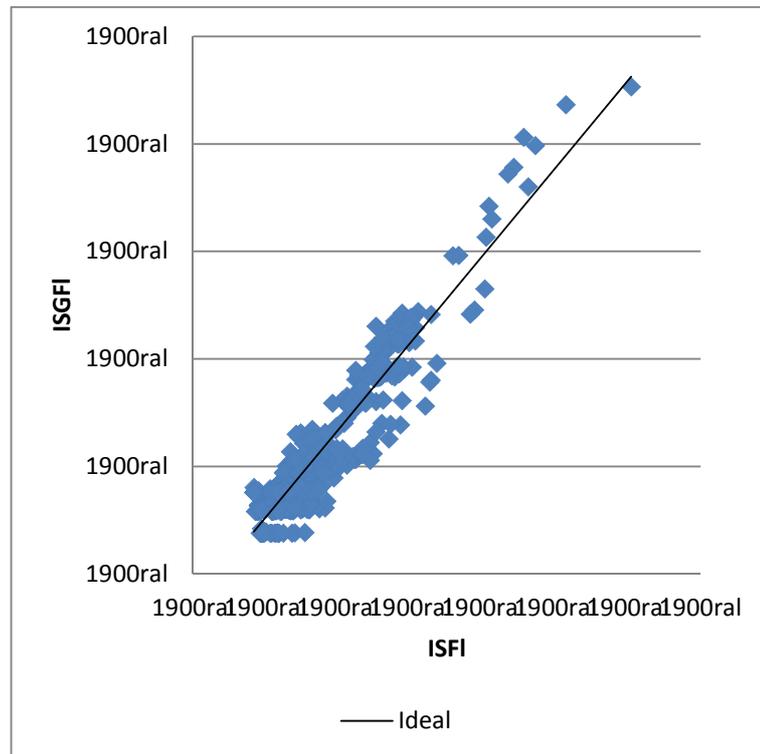
Os casos foram tabulados e os índices de correlação foram medidos utilizando um grau de significância ( $\alpha$ ) de 0,01. Os coeficientes de correlação encontrados são mostrados na tabela 12:

**Tabela 12: Coeficientes de correlação de  $ISfl$  com  $ISGFl$  e de  $ISv$  com  $ISGv$  para a rede IEEE30**

Comparação	$k = 1$	$k = 2$
$ISfl$ e $ISGFl$	91,40%	93,72%
$ISv$ e $ISGv$	97,45%	93,52%

Fonte: Elaborado pelo autor.

No gráfico 1 uma comparação visual entre  $ISfl$  com  $ISGFl$  para  $k = 2$ , através de um gráfico de dispersão:

**Gráfico 1: Comparação de  $ISfl$  e  $ISGFl$  para  $k = 2$  na rede IEEE30**

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tendo em vista a evidência de correlação linear entre os índices avaliados (LARSON e FARBER, 2007), é possível afirmar que  $ISGFl$  e  $ISGv$  são bons índices para utilizar como função de aptidão dos AGFl e AGTn para a rede IEEE30, tanto para  $k = 1$  quanto para  $k = 2$ . Isto justifica o teste destes índices como função de aptidão também para a rede real.

## 6.2 Testes na rede IEEE30

Para os testes na rede IEEE30, é importante salientar que os valores de aptidão são baseados em  $ISGFl$  e  $ISGv$ , enquanto que as taxas de captura consistem na comparação da lista de contingências graves de ramo encontradas pelos AG com a lista de contingências graves de ramos encontradas pelo método clássico utilizando os índices  $ISfl$  e  $ISv$ . Isto implica que os gráficos de evolução do AG mostram a aptidão dos indivíduos em termos de

*ISGFl* e *ISGv*, com vistas a encontrar contingências de ramo que foram ordenadas pelo método clássico de acordo com *ISfl* e *ISv*.

Para o cálculo da taxa de captura em contingências de ordem  $k = 1$ , foram tomadas as 5 contingências mais graves segundo o método clássico comparando-as as 10 contingências mais graves encontradas pelos AG. Para o cálculo da taxa de captura em contingências de ordem  $k = 2$ , foram tomadas as 10 contingências mais graves segundo o método clássico comparando-as as 10 contingências mais graves segundo os AG.

Conforme a formulação da taxa de captura mostra (equação 23), a posição da contingência dentro da lista ordenada não é relevante: O importante para a taxa de captura é que as listas de comparação (Figura 14) contenham os mesmos itens.

Para a execução dos testes na rede IEEE30 foram usadas máquinas 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.

### 6.3 Testes e resultados de AGFI para a rede IEEE30 e contingências de ordem $k = 1$

Nesta seção são apresentadas as combinações de parâmetros testadas para o AGFI, quando utilizado para encontrar contingências de ramo graves (ordem  $k = 1$ ) na rede IEEE30.

#### 6.3.1 Tamanho de população e probabilidade dos operadores

Para definir um tamanho de população adequado foram testadas, para o uso com 8 gerações, as 9 variações de parametrização contidas na tabela 13:

**Tabela 13: Parâmetros relativos à população testados para AGFI quando  $k = 1$  na rede IEEE30**

Tamanho da população ( <i>tpp</i> )	Tamanho da população elite ( <i>tpe</i> )
8	{2, 3, 4}
10	{2, 3, 4}
12	{2, 3, 4}

Fonte: Elaborado pelo autor.

Foram conjugadas às parametrizações de população as seguintes parametrizações relativas a probabilidades e taxas dos operadores:

**Tabela 14: Probabilidades dos operadores testadas para AGFI quando  $k = 1$  na rede IEEE30**

Frequência de cruzamento ( <i>fcr</i> )	Frequência de cruzamento por pontos de corte ( <i>fpc</i> )	Taxa de Mutação ( <i>tmt</i> )	Probabilidade de seleção igualmente dividida ( <i>psi</i> )
{50%; 70%; 90%}	{50%; 70%; 90%}	{1%; 2%; 5%}	{10%}

Elaborado pelo autor.

As 27 variações da tabela 14 associadas às 9 variações da tabela 13 perfizeram um total de 243 variações testadas para AGFI quando  $k = 1$  na rede IEEE30.

Tendo em vista o tamanho reduzido da rede IEEE30, para contingências de ordem  $k = 1$ , foram rodadas diretamente 1000 execuções do AGFI para as 243 variações. A parametrização que obteve a taxa de captura média mais alta para as 8 gerações é apresentada na tabela 15 e escolhida para a próxima etapa de teste de parâmetros.

**Tabela 15: Melhor parametrização encontrada na fase 1 para AGFI quando  $k = 1$  na rede IEEE30**

Tamanho da população ( $tp$ )	Tamanho da população elite ( $tpe$ )	Frequência de cruzamento ( $fcr$ )	Frequência de cruzamento por pontos de corte ( $fpc$ )	Taxa de Mutação ( $tm$ )	Probabilidade de seleção igualmente dividida ( $psi$ )	Taxa de captura média ( $tcr$ )
12	3	80%	50%	5%	10%	97,33%

Fonte: Elaborado pelo autor

### 6.3.2 Epidemia, supressão e busca local

Tendo em vista a obtenção de uma taxa média de captura de 97,33% com 8 gerações, foi decidido não testar parâmetros para os outros operadores. A decisão justifica-se pois a busca local é feita por troca de ramos, e que este tipo de cruzamento é específico para contingências múltiplas. Quanto à epidemia, não há saturação em contingências de ordem  $k = 1$ , ao menos não utilizando o mecanismo de codificação que foi utilizado. A supressão não se justificaria com uma taxa média de captura de 97,33%.

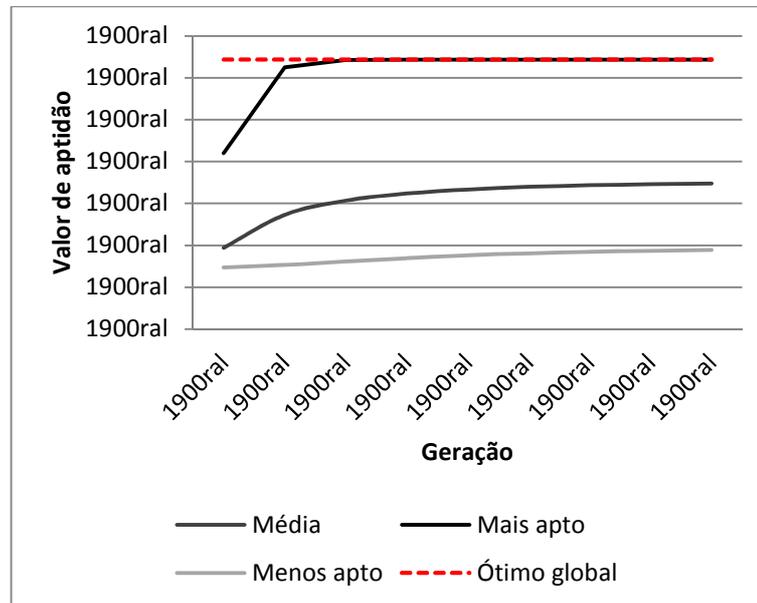
### 6.3.3 Resultados do AGFI na rede IEEE30 para contingências de ordem $k = 1$

Para a obtenção dos resultados completos, foram rodadas, novamente, 1000 execuções do AGFI, utilizando a melhor parametrização encontrada (tabela 15). A quantidade de gerações máxima do critério de parada foi estipulada em 8 gerações.

Em 999 das 1000 rodadas testadas, o AGFI encontrou a contingência mais grave segundo *ISGFI*.

A média da taxa de captura de 1000 rodadas do AGFI em comparação ao método clássico utilizando *ISFI* foi de 97,33%.

No gráfico 2 são mostradas as curvas de evolução da função de aptidão dos indivíduos da população de retorno contendo 10 indivíduos. As curvas descrevem, geração a geração, a média do valor de aptidão do melhor e do pior indivíduo da população de retorno, bem como da média da aptidão dos indivíduos da população de retorno. É possível notar que, em média, a partir da 2ª geração o valor da aptidão do melhor indivíduo encontrado foi de 12,50, o que é bem próximo ao ótimo global de 12,8726.

**Gráfico 2: Evolução da aptidão da população de retorno para AGFI quando  $k = 1$  na rede IEEE30**

Fonte: Elaborado pelo autor.

Embora a taxa de captura de 97,33% seja animadora, cabe salientar que, em média, 73,02% do espaço de buscas foi varrido pelo AGFI na rede IEEE30 com vistas a encontrar contingências graves de ordem  $k = 1$ . Uma justificativa possível para este fato é de que a codificação do cromossomo dos AG desenvolvidos favorece a execução do método para contingências de ramo de ordem  $k \geq 2$ . Isto ocorre pois, conforme visto na seção 6.1, contingências múltiplas graves envolvem, geralmente, um conjunto limitado de ramos. Essa característica gera blocos similares nos cromossomos de contingências múltiplas graves. Em contingências de ordem  $k = 2$ , por exemplo, dois cromossomos que representem contingências distintas que tenham um ramo em comum, terão uma similaridade binária de 50%. Essa similaridade é prejudicada quando tratamos contingências simples.

#### 6.4 Testes e resultados do AGTn para a rede IEEE30 e contingências de ordem $k = 1$

Nesta seção são apresentadas as combinações de parâmetros testadas para o AGTn quando utilizado para encontrar contingências graves de ramo (ordem  $k = 1$ ) na rede IEEE30.

##### 6.4.1 Tamanho de população e probabilidade dos operadores

Para definir um tamanho de população adequado foram testadas, para o uso com 8 gerações, as mesmas 9 variações de parametrização contidas na tabela 13 e utilizadas para os testes de parâmetros de AGFI em contingências de ordem  $k = 1$ .

Para o teste das parametrizações do AGTn, foram conjugadas às parametrizações de população as mesmas parametrizações testadas para AGFI e listadas na tabela 14.

Foram testadas 243 variações, e nenhuma delas apresentou taxa de captura acima de 60% rede IEEE30 para contingências de ramo quando da ordem em  $k = 1$ .

#### 6.4.2 Epidemia, supressão e busca local

Dada a baixa taxa de captura apresentada nos testes dos parâmetros do AGTn, foram tentadas parametrizações distintas, baseadas na experiência obtida durante os testes. Tendo em vista o tamanho reduzido da rede IEEE30, para contingências de ordem  $k = 1$ , foram rodadas diretamente 1000 execuções do AGTn durante os testes empíricos.

A melhor parametrização encontrada está contida na tabela 16, e foi obtida para o uso com 60 gerações:

**Tabela 16: Melhor parametrização encontrada para AGTn quando  $k = 1$  na rede IEEE30**

População	Probabilidades de operadores	Epidemia	Supressão	Busca local	Taxa de captura média ( <i>tcr</i> )
<i>tpp</i> = 10 <i>tpe</i> = 3	<i>fcr</i> = 90% <i>fpc</i> = 100% <i>tmt</i> = 1% <i>psi</i> = 10%	<i>uep</i> = Não <i>gsa</i> = -	<i>usp</i> = Sim <i>cnt</i> = 1 <i>gss</i> = 2 <i>ges</i> = 1	<i>usb</i> = Não <i>ibl</i> = - <i>igb</i> = - <i>iip</i> = -	84,09%

Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 6.4.3 Resultados do AGTn na rede IEEE30 para contingências de ordem $k = 1$

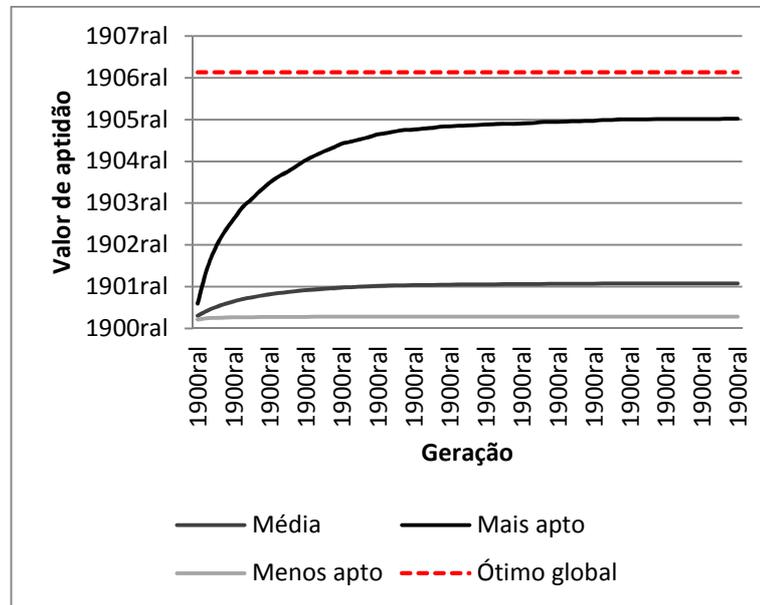
Para a obtenção dos resultados completos do AGTn na rede IEEE30, foram rodadas, novamente, 1000 execuções do AGTn, utilizando a melhor parametrização encontrada (tabela 16).

Em 769 das 1000 rodadas o AGTn encontrou a contingência mais grave segundo *ISGv*.

A média da taxa de captura para as 5 contingências de ramo mais graves com ordem  $k = 1$  segundo *ISv* foi de 84,09%.

No gráfico 3 são mostradas as curvas de evolução da função de aptidão dos indivíduos para população de retorno contendo 10 indivíduos. As curvas descrevem, geração a geração, a média do valor de aptidão do melhor e do pior indivíduo da população de retorno, bem como a curva da média da aptidão dos indivíduos contidos na população de retorno. É possível notar que, em média, a partir da 48ª geração o valor da aptidão do melhor indivíduo encontrado foi de 2002,4879, o que representa 81,55% da gravidade do caso mais grave, que tem um valor de 2455,2724 segundo *ISGTn*.

**Gráfico 3: Evolução da aptidão da população de retorno para AGTn quando  $k = 1$  na rede IEEE30**



Fonte: Elaborado pelo autor.

Embora a taxa de captura de 84,09% seja animadora, cabe salientar que, em média, 81,71% do espaço de buscas foi varrido pelo AGTn. Conforme explicado na seção 6.3.3, uma justificativa possível para este fato é de que a codificação do cromossomo dos AG desenvolvidos favorece a execução do método para contingências de ramo de ordem  $k \geq 2$ .

## 6.5 Testes e resultados de AGFI para a rede IEEE30 e contingências de ordem $k = 2$

Nesta seção são apresentadas as combinações de parâmetros testadas para o AGFI quando utilizado para encontrar contingências graves de ordem  $k = 2$  na rede IEEE30. Todos os parâmetros para a rede IEEE30 e contingências de ordem  $k = 2$  foram definidos para um critério de parada de 100 gerações.

### 6.5.1 Tamanho de população e probabilidade dos operadores

Para definir um tamanho de população adequado foram testadas, para o uso com 100 gerações, as 9 variações de parametrização contidas na tabela 17:

**Tabela 17: Parâmetros relativos à população testados para AGFI quando  $k = 2$  na rede IEEE30**

Tamanho da população ( <i>tpp</i> )	Tamanho da população elite ( <i>tpe</i> )
8	{1, 2, 3}
16	{1, 2, 3}
24	{2, 4, 6}

Fonte: Elaborado pelo autor.

Foram conjugadas às parametrizações de população as parametrizações relativas a probabilidades e taxas dos operadores contidas na tabela 18:

**Tabela 18: Probabilidades dos operadores testadas para AGFI quando  $k = 2$  na rede IEEE30**

Frequência de cruzamento ( <i>fcr</i> )	Frequência de cruzamento por pontos de corte ( <i>fpc</i> )	Taxa de Mutação ( <i>tmt</i> )	Probabilidade de seleção igualmente dividida ( <i>psi</i> )
{50%; 70%; 90%}	{50%; 70%; 90%}	{1%; 2%}	{10%}

Fonte: Elaborado pelo autor.

As 18 variações da tabela 18 associadas às 9 variações da tabela 17 perfizeram um total de 162 variações testadas para AGFI na rede IEEE30.

Para cada uma das 162 variações foram rodadas 100 execuções do AGFI, e as parametrizações que continham a taxa de captura média mais alta foram listadas na tabela 19 e escolhidas para a próxima etapa de teste de parâmetros.

**Tabela 19: Melhores parametrizações encontradas na fase 1 para AGFI quando  $k = 2$  na rede IEEE30**

Tamanho da população ( <i>tpp</i> )	Tamanho da população elite ( <i>tpe</i> )	Frequência de cruzamento ( <i>fcr</i> )	Frequência de cruzamento por pontos de corte ( <i>fpc</i> )	Taxa de Mutação ( <i>tmt</i> )	Probabilidade de seleção igualmente dividida ( <i>psi</i> )	Taxa de captura média ( <i>tcr</i> )
24	2	50%	50%	2%	10%	62%
24	6	50%	50%	1%	10%	58%
24	6	50%	50%	2%	10%	58%
24	2	90%	50%	2%	10%	58%
24	4	50%	50%	2%	10%	56%

Fonte: Elaborado pelo autor

### 6.5.2 Epidemia, supressão e busca local

Para definir boas parametrizações para os outros operadores do AGFI, foram testadas variações nos parâmetros relativos à epidemia, supressão do espaço de busca e busca local.

As variações testadas para os parâmetros de epidemia são listadas na tabela 20:

**Tabela 20: Parâmetros relativos à epidemia testados para AGFI quando  $k = 2$  na rede IEEE30**

Usar epidemia ( <i>uep</i> )	Gerações sem melhora para ativar a epidemia ( <i>gsa</i> )
Não	-
Sim	{8, 14, 20}

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para os parâmetros relativos à supressão do espaço de busca, foram testadas as variações contidas na tabela 21:

**Tabela 21: Parâmetros relativos à supressão testados para AGFI quando  $k = 2$  na rede IEEE30**

Usar supressão ( <i>usp</i> )	Contaminação ( <i>cnt</i> )	Gerações sem melhora para ativar supressão ( <i>gss</i> )	Gerações na lista de supressão ( <i>ges</i> )
Não	-	-	-
Sim	2	5	{3, 5}
Sim	3	5	{3, 5}
Sim	4	5	{3, 5}
Sim	1	10	{3, 5}
Sim	2	10	{3, 5}
Sim	3	10	{3, 5}
Sim	4	10	{3, 5}

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para os parâmetros relativos à busca local do AGFI na rede IEEE30, as variações da tabela 22 foram testadas:

**Tabela 22: Parâmetros relativos à busca local testados para AGFI quando  $k = 2$  na rede IEEE30**

Usar busca local ( <i>usb</i> )	Intervalo da busca local ( <i>ibl</i> )	Indivíduos gerados pela busca local ( <i>igb</i> )	Indivíduos inseridos na população ( <i>iip</i> )
Não	-	-	-
Sim	5	5	{1, 3}
Sim	5	10	5
Sim	10	{5, 10}	{1, 3}
Sim	15	10	1
Sim	15	5	{1, 3}

Fonte: Elaborado pelo autor.

Após rodar 30 execuções para cada uma das 3300 variações possíveis referentes ao produto cartesiano das tabelas 19, 20, 21 e 22, as 10 melhores parametrizações segundo *tcr* foram separadas para mais 100 rodadas de desempate. Após as 100 rodadas, as 3 melhores foram separadas e o melhor *tcr* encontrado foi de 80,17%, obtido para a variação de parâmetros contida na tabela 23:

**Tabela 23: Melhor parametrização encontrada na fase 2 para AGFI quando  $k = 2$  na rede IEEE30**

População	Probabilidades de operadores	Epidemia	Supressão	Busca local	Taxa de captura média ( <i>tcr</i> )
<i>tpp</i> = 24 <i>tpe</i> = 6	<i>fcr</i> = 90% <i>fpc</i> = 50% <i>tmt</i> = 2% <i>psi</i> = 10%	<i>uep</i> = Sim <i>gsa</i> = 8	<i>usp</i> = Sim <i>cnt</i> = 2 <i>gss</i> = 5 <i>ges</i> = 5	<i>usb</i> = Sim <i>ibl</i> = 10 <i>igb</i> = 5 <i>iip</i> = 1	80,17%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com vistas a melhorar a taxa de captura, foram realizados testes empíricos variando praticamente todos os parâmetros envolvidos. Sempre utilizando a taxa média de captura de 30 execuções, inicialmente foram testados tamanhos de população de 8, 10, 30 e 45. Após esses testes, prosseguiu-se com taxas de cruzamento de 60, 80 e 100, e taxas de mutação de 1, 3 e 5%. Após encontrar parametrizações razoáveis, os parâmetros foram alterados em unidades menores, de forma intuitiva, observando o impacto nas variáveis de controle (taxa de captura e curva de evolução do valor de aptidão ao longo das gerações). Após a inspeção, uma boa parametrização foi encontrada, e a média de 1000 execuções desta parametrização apontou uma taxa de captura de 97,44%. A parametrização encontrada é mostrada na tabela 24:

**Tabela 24: Melhor parametrização encontrada para AGFI quando  $k = 2$  na rede IEEE30**

População	Probabilidades de operadores	Epidemia	Supressão	Busca local	Taxa de captura média ( <i>tcr</i> )
<i>nge</i> = 10000 <i>tpp</i> = 18 <i>tpe</i> = 13	<i>fcr</i> = 100% <i>fpc</i> = 100% <i>tmt</i> = 5% <i>psi</i> = 36%	<i>uep</i> = Não <i>gsa</i> = -	<i>usp</i> = Não <i>cnt</i> = - <i>gss</i> = - <i>ges</i> = -	<i>usb</i> = Sim <i>ibl</i> = 1 <i>igb</i> = 5 <i>iip</i> = 1	97,43%

Fonte: Elaborado pelo autor.

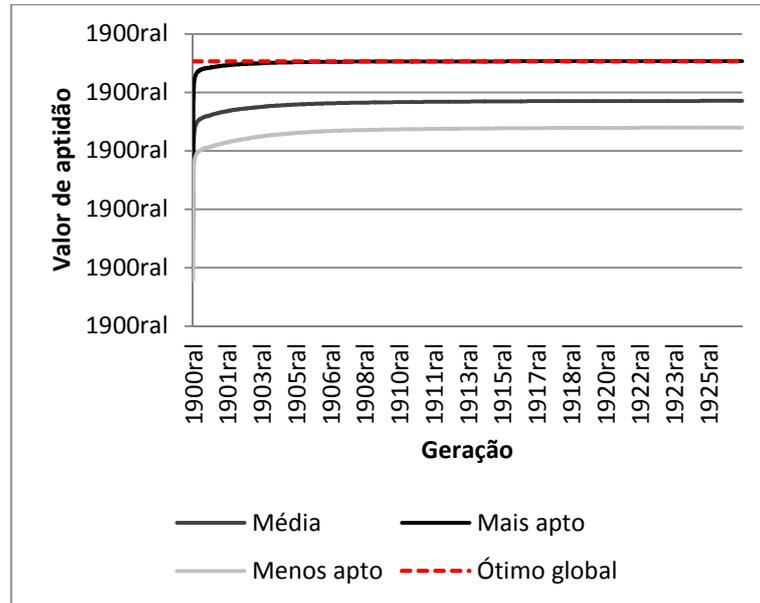
### 6.5.3 Resultados de AGFI na rede IEEE30 para contingências de ordem $k = 2$

Para obtenção dos resultados completos do AGFI na rede IEEE30, foram rodadas, novamente, 1000 execuções do AGFI, utilizando a melhor parametrização encontrada (tabela 24).

Em todas as 1000 execuções, o AGFI encontrou a contingência mais grave segundo *ISGFI*, sendo que a média da taxa de captura para as 1000 rodadas foi de 97,43%.

No gráfico 4 são mostradas as curvas de evolução da função de aptidão dos indivíduos da população de retorno. As curvas descrevem, geração a geração, a média do valor de aptidão do melhor e do pior indivíduo da população de retorno, bem como da média da aptidão dos indivíduos da população de retorno. É possível notar que, em média, já nas primeiras gerações da parametrização, o valor médio de aptidão do melhor indivíduo encontrado está acima de 20. Próximo da 500ª geração, o valor médio do *ISGFI* do melhor indivíduo encontrado passa de 22, o que é bem próximo ao ótimo global de 22,6533.

**Gráfico 4: Evolução da aptidão da população de retorno para AGFI quando  $k = 2$  na rede IEEE30**

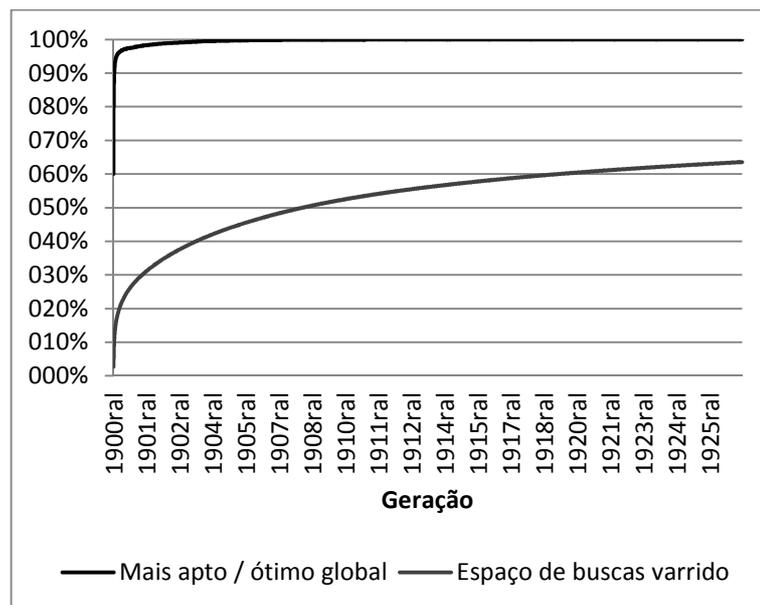


Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados obtidos mostram uma curva de crescimento do valor médio da função de aptidão ao longo das gerações, o que é esperado em problemas de otimização com funções objetivo de maximização.

Para uma avaliação da varredura do espaço de busca, foi elaborado o gráfico 5 que mostra a curva de evolução do valor de aptidão do melhor indivíduo da população de retorno em relação ao ótimo global. Outra curva mostra a evolução do percentual de varredura do espaço de busca:

**Gráfico 5: Evolução da média do mais apto e evolução da varredura do espaço de busca para AGFI quando  $k = 2$  na rede IEEE30**



Fonte: Elaborado pelo autor.

O tempo médio de execução foi calculado utilizando uma amostra de 10 execuções. A média do tempo de execução do AGFl para contingências de ordem  $k = 2$  na rede IEEE30 foi de 11,2 s, com um desvio padrão de 3,08 s.

## 6.6 Testes e resultados de AGTn para a rede IEEE30 e contingências de ordem $k = 2$

Nesta seção são apresentadas as combinações de parâmetros testadas para o AGTn quando utilizado para encontrar contingências graves de ordem  $k = 2$  na rede IEEE30. Todos os parâmetros para a rede IEEE30 e contingências de ordem  $k = 2$  foram definidos para um critério de parada de 100 gerações.

### 6.6.1 Tamanho de população e probabilidade dos operadores

Para definir tamanho de população e taxa dos operadores adequados ao AGTn, foram testadas as mesmas variações de parâmetros testadas para o AGFl e contidas nas tabelas 17 e 18.

As 162 variações foram testadas em 100 execuções do AGTn, e as parametrizações que continham o *tcr* médio mais alto foram listadas na tabela 25 e escolhidas para a próxima etapa de teste de parâmetros.

**Tabela 25: Melhores parametrizações encontradas na fase 1 para AGTn quando  $k = 2$  na rede IEEE30**

Tamanho da população ( <i>tpp</i> )	Tamanho da população elite ( <i>tpe</i> )	Frequência de cruzamento ( <i>fcr</i> )	Frequência de cruzamento por pontos de corte ( <i>fpc</i> )	Taxa de Mutação ( <i>tmt</i> )	Probabilidade de seleção igualmente dividida ( <i>psi</i> )	Taxa de captura média ( <i>tcr</i> )
24	2	50%	50%	2%	10%	90,2%
24	4	50%	50%	2%	10%	87,8%
24	6	70%	90%	2%	10%	87,2%
24	2	50%	90%	2%	10%	87%
24	4	50%	90%	2%	10%	87%
24	6	50%	70%	2%	10%	86,2%

Fonte: Elaborado pelo autor

### 6.6.2 Epidemia, supressão e busca local

Para definir boas parametrizações para os outros operadores do AGTn, foram testadas variações nos parâmetros relativos à epidemia, supressão do espaço de busca e busca local. Os valores variados foram idênticos aos testados para o AGFl e contidos nas tabelas 20, 21 e 22.

Tendo em vista que 11800 parametrizações (multiplicação das tabelas 10, 21, 22 e 25) precisavam ser testadas, optou-se por rodar, inicialmente, 30 execuções para cada parametrização. Pelo tamanho pequeno da amostra, optou-se por separar as 1000 melhores parametrizações para uma segunda bateria de testes com 100 execuções para cada parametrização. Desse teste, 10 parametrizações foram selecionadas para um teste final com 1000 execuções para cada parametrização. A melhor parametrização encontrada, com uma taxa de captura de 96,90% é mostrada na tabela 26:

**Tabela 26: Melhor parametrização encontrada para AGTn quando  $k = 2$  na rede IEEE30**

População	Probabilidades de operadores	Epidemia	Supressão	Busca local	Taxa de captura média ( <i>tcr</i> )
<i>nge</i> = 100 <i>tpp</i> = 24 <i>tpe</i> = 2	<i>fcr</i> = 70% <i>fpc</i> = 50% <i>tmt</i> = 2% <i>psi</i> = 10%	<i>uep</i> = Sim <i>gsa</i> = 14	<i>usp</i> = Não <i>cnt</i> = - <i>gss</i> = - <i>ges</i> = -	<i>usb</i> = Sim <i>ibl</i> = 5 <i>igb</i> = 5 <i>iip</i> = 3	96,90%

Fonte: Elaborado pelo autor.

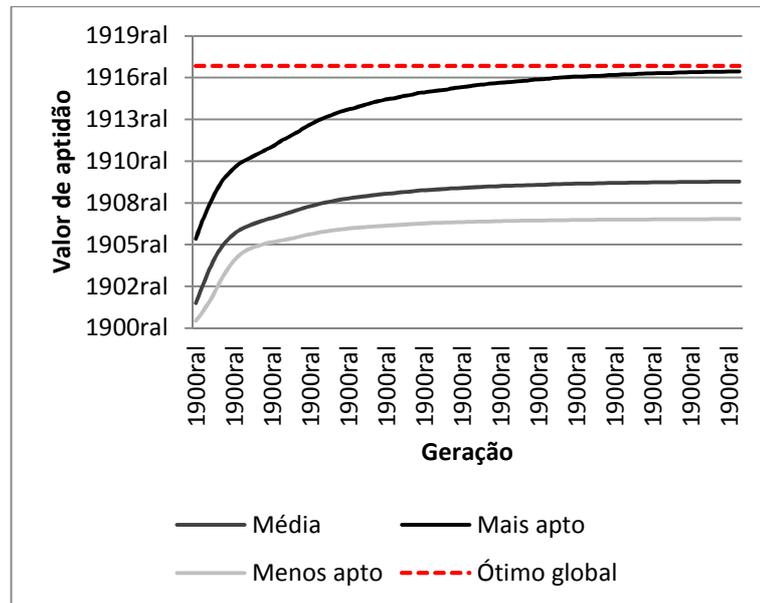
### 6.6.3 Resultados de AGTn na rede IEEE30 para contingências de ordem $k = 2$

Para a obtenção dos resultados completos do AGTn na rede IEEE30 foram rodadas, novamente, 1000 execuções do AGTn, utilizando a melhor parametrização encontrada (tabela 26).

Em 967 das 1000 execuções, o AGTn encontrou a contingência mais grave segundo *ISGv*, sendo que a média da taxa de captura para as 1000 rodadas foi de 96,90%.

No gráfico 6 são mostradas as curvas de evolução da função objetivo dos indivíduos da população de retorno. As curvas descrevem, geração a geração, a média do valor da função de aptidão do melhor e do pior indivíduo da população de retorno, bem como da média do valor de aptidão dos indivíduos da população de retorno. É possível notar que a curva que representa, em média, o melhor indivíduo encontrado, está distante da curva que representa, em média, a média da população de retorno. Isso ocorre porque a segunda contingência mais grave, sob o prisma de *ISGv*, tem um valor da função objetivo de 74,05% do valor do caso mais grave, o que justifica a distância entre as curvas. O caso mais grave obtém um valor absoluto bem maior no índice.

**Gráfico 6: Evolução da aptidão da população de retorno para AGTn quando  $k = 2$  na rede IEEE30**

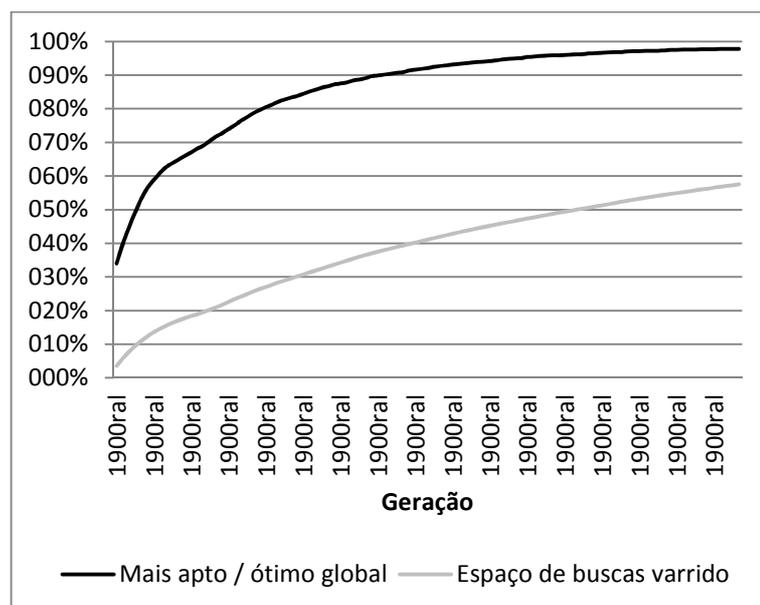


Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados obtidos mostram uma curva de crescimento do valor médio da função de aptidão ao longo das gerações, o que é esperado em problemas de otimização com funções objetivo de maximização.

Para uma avaliação da varredura do espaço de buscas, foi elaborado o gráfico 7, que mostra a curva de evolução do valor de aptidão do melhor indivíduo da população de retorno em relação ao ótimo global. Outra curva mostra a evolução do percentual de varredura do espaço de busca:

**Gráfico 7: Evolução da média do mais apto e evolução da varredura do espaço de busca para AGTn quando  $k = 2$  na rede IEEE30**



Fonte: Elaborado pelo autor.

O tempo médio de execução foi calculado utilizando uma amostra de 10 execuções. A média do tempo de execução do AGTn para contingências de ordem  $k = 2$  na rede IEEE30 foi de 10,2 s, com um desvio padrão de 2,48 s.

## 6.7 Conclusões dos testes na rede IEEE30

É importante verificar que o AGFI e o AGTn foram capazes de, em média, encontrar em 100 e 94,30% das vezes a contingência mais grave (ótimo global) segundo os índices *ISGFI* e *ISGv*.

Na tabela 27 consta um resumo dos resultados obtidos para o AGFI na rede IEEE30:

**Tabela 27: Resultados obtidos para o AGFI na rede IEEE30**

Rede	Ordem	AGFI			
		Captura média em 1000 rodadas	Método Clássico	Rodadas onde encontrou o ótimo global	Espaço de busca varrido ao fim do AG
IEEE30	$k = 1$	97,33%	ANAREDE®	999	73,02%
IEEE30	$k = 2$	97,43%	ANAREDE®	1000	63,57%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na tabela 28 há um resumo dos resultados obtidos para o AGTn:

**Tabela 28: Resultados obtidos para o AGTn na rede IEEE30**

Rede	Ordem	AGTn			
		Captura média em 1000 rodadas	Método Clássico	Rodadas onde encontrou o ótimo global	Espaço de busca varrido ao fim do AG
IEEE30	$k = 1$	84,09%	ANAREDE®	769	81,71%
IEEE30	$k = 2$	96,90%	ANAREDE®	967	57,55%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na seção de características da rede IEEE30 é visto que o topo da lista de contingências mais graves, sob o prisma de violações de potência ativa nos ramos, difere bastante do topo da lista das contingências mais graves sob o prisma de violações de tensão nas barras. Esse fato mostra que é mais seguro testar as parametrizações dos dois AG de forma separada.

Ao avaliar as tabelas 27 e 28, é possível perceber que a média da taxa de captura foi, para contingências de ordem  $k = 2$ , de 97,43 e 96,90% em comparação ao método clássico utilizando os índices *ISFI* e *ISv* do ANAREDE®. Essas taxas de captura justificam o estudo dos AGFI e AGTn em uma rede real.

Ao comparar as linhas das tabelas 27 e 28, é possível perceber que as taxas de captura para contingências de ramo de ordem  $k = 2$  são maiores do que as taxas de captura obtidas para contingências de ramo de ordem  $k = 1$ . Além disso, é possível notar uma menor varredura do espaço de buscas. Isso denota uma maior eficiência do método em encontrar contingências de ramo de ordem  $k = 2$ .

Uma explicação possível para esse comportamento é a codificação do cromossomo. Em contingências de ordem  $k = 1$ , cada cromossomo representa um ramo, e não há, portanto, similaridade entre contingências de ramo de ordem  $k = 1$ . Em contingências de ordem  $k = 2$ , a codificação faz com que duas contingências distintas que envolvam o mesmo ramo, tenham 50% dos *bits* da cadeia exatamente iguais. A importância dessa similaridade é realçada por uma característica da rede IEEE30: Conforme visto na seção de características da rede, todas as 5 contingências de ramos de ordem  $k = 2$  mais graves, sob o ponto de vista de violações de tensão nas barras (*ISGv*), contém o ramo que liga as barras 27 e 28. Quando avaliadas sob o prisma de *ISGFl*, 3 das 5 contingências mais graves contém o ramo que liga as barras 4 e 12, enquanto que 2 das 5 contingências mais graves contém o ramo que liga as barras 2 e 5.

A alta concentração de contingências graves em torno do ramo que liga as barras 27 e 28 pode justificar por que a melhor parametrização encontrada para AGTn não utiliza a supressão do espaço de buscas, e sim uma busca local a cada 5 gerações. Caso essa característica seja mantida em redes reais de grande porte, estudos futuros sobre estratégias de busca local, que levem em conta esse fato, podem tornar o AGTn mais eficiente.

Quanto às curvas obtidas para a evolução do valor da função de aptidão ao longo das gerações, elas mostram um comportamento condizente com as curvas encontradas em outros trabalhos que envolvem metaheurísticas aplicadas a problemas de otimização cuja função objetivo visa maximização (PAPADIMITRIOU e KENETH, 1998). Embora os resultados sejam satisfatórios, acredita-se que testes mais rigorosos sobre os parâmetros do AG podem ainda reduzir a varredura do espaço de buscas, principalmente para contingências de ordem  $k = 2$ .

Tendo em vista que o objetivo inicial é uma taxa acima de 80% que justifique um estudo em uma rede real, testes mais aprofundados sobre a parametrização serão realizados em trabalhos futuros.

## 6.8 Comparação com trabalhos similares

Alguns dos trabalhos relacionados na revisão bibliográfica utilizaram Algoritmos Genéticos para realizar a tarefa de Seleção de Contingências. Embora uma comparação direta quanto aos resultados atingidos não seja possível, dado que diferentes aspectos são abordados, nesta seção os parâmetros, objetivos e métodos utilizados por estes trabalhos são comparados aos parâmetros, objetivos e métodos utilizados pelos AGFl e AGTn para a rede IEEE30.

A tabela 29 ilustra as características e aplicações dos métodos estudados em comparação a AGFl e AGTn:

**Tabela 29: Comparação dos objetivos e aplicações dos métodos estudados à AGFI e AGTn**

	Saitoh, Takano & Toyoda (1996)	Nims, El-Keib & Smith (1997)	Sudersan, AbdelRahman & Radman (2004)	AGFI e AGTn
Objetivo	Triagem	Encontrar todas as contingências graves	Encontrar contingências graves e posicionar equipamentos corretivos	Encontrar todas as contingências graves
Prisma	Estabilidade de tensão	Estabilidade de tensão	Violações de fluxo de linha Violações de tensão nas barras	Violações de fluxo de linha Violações de tensão nas barras
Redes testadas	IEEE30	IEEE30 e IEEE57	IEEE14 e IEEE30	IEEE30 e rede real de 810 barras e 1340 ramos

Fonte: Elaborado pelo autor.

A tabela 30 ilustra uma comparação das funcionalidades implementadas nos trabalhos estudados às funcionalidades implementadas neste trabalho:

**Tabela 30: Comparação das funcionalidades e aplicações dos métodos estudados à AGFI e AGTn**

	Saitoh, Takano & Toyoda (1996)	Nims, El-Keib & Smith (1997)	Sudersan, AbdelRahman & Radman (2004)	AGFI e AGTn
Equipamentos possíveis na contingencia	Linhas	Linhas, transformadores e capacitores	Linhas	Linhas
Ordem $k$	2, invalidando cromossomos com segmentos iguais	2, aceitando cromossomos com segmentos iguais como ordem 1	2, não explicando o que é feito com cromossomos com segmentos iguais	Varia de acordo com o tamanho da rede. Aceita até 10 na rede IEEE30, e até 5 na rede real de 810 barras
Tratamento de não convergência do fluxo de potência	Não necessita cálculo do Fluxo de Potência	Valor de aptidão igualado a zero (considera muito grave)	Não informado	Retorno de uma lista com todos os casos de falha (considera muito grave)
Busca local	Não utiliza	Incremento e decremento dos segmentos do cromossomo	Utiliza uma busca local, mas não informa a política	Opcional. Cruzamento por troca de ramos entre indivíduos da população elite
Epidemia	Não utiliza	Não utiliza	Não utiliza	Opcional. Ocorre após determinado número de gerações sem encontrar um indivíduo mais apto
Supressão do espaço de buscas	Teorema do	Não utiliza	Não utiliza	Opcional. Invalidação de cromossomos que contenham ramos muito utilizados durante as últimas gerações
Tipos de cruzamento aceitos	Ponto único	Ponto único	Ponto único	Pontos múltiplos e troca de ramos

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na tabela 31, os métodos estudados são comparados ao método proposto quanto aos parâmetros e os melhores resultados obtidos para a rede IEEE30:

**Tabela 31: Comparação dos parâmetros e resultados dos métodos estudados à AGFI e AGTn**

	<b>Saitoh, Takano &amp; Toyoda (1996)</b>	<b>Nims, El-Keib &amp; Smith (1997)</b>	<b>Sudersan, AbdelRahman &amp; Radman (2004)</b>	<b>AGFI</b>	<b>AGTn</b>
Formação do cromossomo	Justaposição de segmentos	Justaposição de segmentos	Justaposição de segmentos	Justaposição de segmentos	Justaposição de segmentos
Função de aptidão	Maximização. Função de energia transiente simplificada	Minimização. Valor singular mínimo da Jacobiana do Fluxo de Potência	Maximização. DCI (violações de fluxo de linha) VSI (violações de tensão nas barras)	Maximização. ISGFI	Maximização. ISGTn
População inicial	Aleatória	Aleatória	Aleatória	Aleatória	Aleatória
Tamanho da população	10	20	Não informado	18	24
Tamanho da população elite	Não utiliza	Não utiliza	Não utiliza	13	12
Número de gerações	10	20	Não informado	10000	100
Seleção	Roleta	Torneio	Não informado	Posicionamento linear, com reserva de probabilidade igualmente dividida de 36%	Posicionamento linear, com reserva de probabilidade igualmente dividida de 10%
Taxa de mutação	3% nas 50 primeiras gerações, e 2% nas 50 gerações finais	1%	Alta (número exato não informado)	5%	2%
Taxa de cruzamento	50%	90%	Não informada	100% de taxa de cruzamento. Todos os cruzamentos por pontos múltiplos	70% de taxa de cruzamento. 50% dos cruzamentos por pontos múltiplos, e 50% por troca de ramos
Simulações	Não especifica	30	Não especifica	1000	1000
Resultados	96% de taxa de captura. Varredura do espaço de busca não informada	98% em 60% de varredura. 99,5% em 70% de varredura	Acima de 96%. Varredura do espaço de busca não informada	97,43% em 63,57% de varredura	96,90% em 57,55% de varredura

Fonte: Elaborado pelo autor.

Embora os trabalhos levem em consideração diferentes aspectos para a seleção das contingências, é possível notar similaridade entre as taxas de captura obtidas para a rede IEEE30, o que denota um bom motivo para proceder com os testes na rede real.

## 7 TESTES E RESULTADOS NA REDE REAL

### 7.1 Características da rede real

Na rede real existem 810 barras e 1340 ramos. Nesta configuração de rede, são possíveis 1340 contingências de ramo de ordem  $k = 1$  e 897130 contingências de ramo de ordem  $k = 2$  (a combinação de 1340 ramos tomados 2 a 2). Durante alguns dias foram calculados e tabulados os Índices de Performance *ISGFI* e *ISGTn* sobre cálculos do Fluxo de Potência via FCDR (STOTT e ALSAC, 1973) para todas as contingências de ordem  $k = \{1, 2\}$ . O FCDR foi escolhido devido sua eficiência para a execução do cálculo do Fluxo de Potência. Na tabela 32 constam as 20 contingências de ordem  $k = 1$  mais graves segundo *ISGFI*:

**Tabela 32: 20 contingências de ordem  $k = 1$  mais graves segundo *ISGFI* - rede real**

<i>Ranking</i>	Barra origem	Barra destino	<i>ISGFI</i>
1	992	993	3978,6807
2	994	995	3144,8462
3	976	995	2675,6672
4	976	933	2151,4192
5	1159	1155	2089,9375
6	1160	1155	2073,1077
7	1431	1457	1732,5710
8	1420	1449	664,9221
9	1196	1193	512,8509
10	1195	1193	512,8437
11	1233	1455	497,8996
12	1456	1457	471,1635
13	1281	1283	429,7567
14	1196	1420	408,6756
15	1309	1241	399,0078
16	1381	1397	389,8499
17	1272	1295	384,3667
18	1447	1458	345,9073
19	1232	1233	341,6417
20	1397	1412	274,5742

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na tabela 33 constam as 20 contingências de ordem  $k = 1$  mais graves sob o ponto de vista de *ISGTn*:

**Tabela 33: 20 contingências de ordem  $k = 1$  mais graves segundo *ISGv* - rede real**

<b>Ranking</b>	<b>Barra origem</b>	<b>Barra destino</b>	<b>ISGTn</b>
1	739	732	11418,8926
2	763	762	7516,3623
3	622	621	6454,3232
4	1309	1241	3618,3269
5	723	736	2949,8770
6	344	349	2881,6763
7	678	778	2495,2739
8	518	692	2458,7007
9	1138	1232	2364,9719
10	733	736	2081,3940
11	269	778	2021,0859
12	981	1487	1917,3826
13	1232	1233	1745,9141
14	1161	1158	1735,9150
15	1160	1158	1695,0393
16	4	8	1668,8917
17	732	748	1659,1171
18	458	457	1640,5806
19	553	594	1632,2223
20	1218	1217	1601,4408

Fonte: Elaborado pelo autor.

Continuando com a tabulação dos resultados do método clássico, as 30 contingências de ramos para ordem  $k = 2$  mais graves segundo *ISGFl* na rede real são listadas na tabela 34:

**Tabela 34: 30 contingências de ordem  $k = 2$  mais graves segundo ISGFI - rede real**

Ranking	Caso				ISGFI
	Ramo 1		Ramo 2		
	Barra origem	Barra destino	Barra origem	Barra Destino	
1	1431	1457	1431	1459	16220,4238
2	976	995	992	993	12014,8984
3	976	993	994	995	11951,0283
4	992	993	1159	1155	5964,4355
5	992	993	1160	1155	5947,6455
6	992	993	1431	1457	5606,3647
7	992	993	1486	1253	5487,0420
8	978	982	992	993	5300,1196
9	992	993	1309	1241	5135,5264
10	994	995	1159	1155	5130,3843
11	994	995	1160	1155	5113,6587
12	982	988	992	993	4975,6953
13	752	762	992	993	4975,2686
14	992	993	1230	1227	4774,2432
15	994	995	1431	1457	4772,4370
16	976	995	1159	1155	4660,4033
17	992	993	1136	1227	4649,7725
18	976	995	1160	1155	4643,5903
19	760	766	992	993	4527,1465
20	992	993	1139	1230	4456,9863
21	992	993	1190	1230	4456,9805
22	992	993	1140	1230	4456,9585
23	234	762	992	993	4455,0947
24	234	1477	992	993	4453,3882
25	1431	1457	1457	1459	4451,6138
26	992	993	1420	1449	4438,2896
27	992	993	1230	1228	4415,7314
28	992	993	1229	1228	4415,7139
29	992	993	1195	1193	4374,4092
30	992	993	1196	1193	4374,3638

Fonte: Elaborado pelo autor.

E, finalmente, na tabela 35, constam as 30 contingências mais graves sob o ponto de vista de ISGv:

Tabela 35: 30 contingências de ordem  $k = 2$  mais graves segundo *ISGv* - rede real

Ranking	Caso				ISGv
	Ramo 1		Ramo2		
	Barra origem	Barra destino	Barra origem	Barra destino	
1	500	572	739	732	29766,1914
2	739	732	749	748	25143,7520
3	739	732	763	762	23583,4160
4	763	762	1230	1227	20537,0059
5	622	776	763	762	20437,6504
6	472	646	763	762	19829,1445
7	678	739	739	732	19719,6230
8	720	736	739	732	19684,4512
9	234	762	763	762	19384,4199
10	1176	1175	1177	1175	19037,8184
11	234	1477	763	762	17997,6328
12	622	621	739	732	17022,1074
13	739	732	732	742	16868,2676
14	763	762	1136	1227	15808,8516
15	344	349	739	732	15775,3691
16	739	732	809	808	15748,2607
17	763	762	1479	1480	15684,5234
18	763	762	1484	1479	15600,6445
19	576	577	739	732	15591,8018
20	739	732	739	794	14974,3711
21	739	732	795	794	14768,7588
22	739	732	794	797	14559,5059
23	524	523	622	621	14555,2314
24	285	833	739	732	14224,8262
25	776	542	763	762	14163,4873
26	542	612	622	621	13981,3164
27	502	577	739	732	13968,8154
28	502	577	739	732	13968,8154
29	752	762	763	762	13906,6543
30	739	732	760	766	13873,3447

Elaborado pelo autor.

Ao avaliar as tabelas 34 e 35 (ordem  $k = 2$  para *ISGFl* e *ISGv*) é possível notar que, nas 10 contingências mais graves, existem ramos que se repetem.

Para *ISGFl* é possível notar que 7 das 10 contingências de ordem  $k = 2$  mais graves envolvem a saída de operação do ramo que liga as barras 992 e 993.

Para *ISGv* é possível notar que os ramos que ligam as barras 763 e 762, e as barras 739 e 732, aparecem, cada um, em 5 das 10 contingências mais graves.

Esta característica da rede mostra que uma codificação do cromossomo que mantenha a mesma cadeia de *bits* para representar um mesmo ramo tende a encontrar bons resultados nesta rede, e esta característica foi explorada na construção dos AG, para ordens  $k \geq 1$ .

Ao comparar as tabelas 32 e 34, bem como as tabelas 33 e 35, é possível notar que ramos que estão contidos entre as contingências mais graves de ordem  $k = 1$  estão presentes na lista de contingências mais graves de ordem  $k = 2$ .

É possível notar que, sob o prisma de *ISGFl*, todas as 10 contingências mais graves de ordem  $k = 2$  têm, entre um de seus ramos, ao menos um ramo contido na lista das 10 contingências mais graves de ordem  $k = 1$ .

De forma análoga, sob o prisma de *ISGv*, 7 das 10 contingências mais graves de ordem  $k = 2$  tem, entre um de seus ramos, ao menos um ramo contido na lista das 10 contingências mais graves de ordem  $k = 1$ .

## 7.2 Testes na rede real

Para os testes na rede real de 810 barras, é importante salientar que tanto os valores de aptidão quanto as taxas de captura são baseados em *ISGFl* e *ISGv*. A taxa de captura, para esta rede, consiste na comparação da lista de contingências graves de ramo encontradas pelos AG com a lista de contingências graves de ramos encontradas pelo método clássico. Tendo em vista a grande quantidade de casos, optou-se por utilizar para o método clássico os índices *ISGFl* e *ISGv* calculados sobre o Fluxo de Potência obtido através do método FCDR, mais eficiente (STOTT e ALSAC, 1973).

Na rede real foram testadas apenas contingências de ordem  $k = 2$ , tendo em vista que o principal objetivo dos AG é encontrar contingências múltiplas, ou seja, ordem  $k \geq 2$ .

Conforme a formulação da taxa de captura mostra (equação 23), a posição da contingência dentro da lista ordenada não é relevante: O importante para a taxa de captura é que as listas de comparação (figura 14) contenham os mesmos itens.

Para a execução dos testes na rede real foram utilizadas as mesmas máquinas descritas na seção 6.2.

## 7.3 Testes e resultados de AGFI para a rede real e contingências de ordem $k = 2$

Nesta seção são apresentadas as combinações de parâmetros testadas para o AGFI quando utilizado para encontrar contingências graves de ordem  $k = 2$  na rede real de 810 barras e 1340 ramos.

### 7.3.1 Tamanho de população e probabilidade dos operadores

Tendo em vista um espaço de busca maior, para definir um tamanho de população adequado foram testadas, juntamente com variações nos tamanhos das populações, variações nos números de geração utilizados. Ao todo, 14 variações possíveis foram definidas e estão contidas na tabela 36:

**Tabela 36: Parâmetros relativos à população testados para AGFI quando  $k = 2$  na rede real**

Tamanho da população ( <i>tpp</i> )	Tamanho da população elite ( <i>tpe</i> )	Número de gerações ( <i>nge</i> )
50	10	250
50	15	200
70	15	200
70	20	150
100	20	200
100	30	150
120	25	150
120	30	125
130	30	150
130	35	125
140	30	150
140	35	125
140	35	100
150	35	100

Fonte: Elaborado pelo autor.

Foram conjugadas, às parametrizações de população, as parametrizações relativas a probabilidades e taxas dos operadores, que estão descritas na tabela 37:

**Tabela 37: Probabilidades dos operadores testadas para AGFI quando  $k = 2$  na rede real**

Frequência de cruzamento ( <i>fcr</i> )	Frequência de cruzamento por pontos de corte ( <i>fpc</i> )	Taxa de Mutação ( <i>tmt</i> )	Probabilidade de seleção igualmente dividida ( <i>psi</i> )
50%	{50%, 60%, 70%, 80%, 90%}	{0,5%, 1%, 2%, 3%, 10%}	10%
60%	{50%, 60%, 70%, 80%, 90%}	{0,5%, 1%, 2%, 3%, 10%}	10%
70%	{50%, 60%, 70%, 80%, 90%}	{0,5%, 1%, 2%, 3%, 10%}	10%
80%	{50%, 60%, 70%, 80%, 90%}	{0,5%, 1%, 2%, 3%, 10%}	10%
90%	{50%, 60%, 70%, 80%, 90%}	{0,5%, 1%, 2%, 3%, 10%}	10%

Elaborado pelo autor.

As 125 variações da tabela 37 associadas às 14 variações da tabela 36 perfizeram um total de 1750 variações testadas para AGFI na rede real.

Para as 1750 variações, foram rodadas 100 execuções do AGFI, e as parametrizações que continham a taxa de captura média mais alta foram listadas na tabela 38, e escolhidas para a próxima etapa de teste de parâmetros.

**Tabela 38: Melhores parametrizações encontradas na fase 1 para AGFI quando  $k = 2$  na rede real**

Tamanho da população ( <i>tpp</i> )	Tamanho da população elite ( <i>tpe</i> )	Número de gerações ( <i>nge</i> )	Frequência de cruzamento ( <i>fcr</i> )	Frequência de cruzamento por pontos de corte ( <i>fpc</i> )	Taxa de Mutação ( <i>tmt</i> )	Probabilidade de seleção igualmente dividida ( <i>psi</i> )	Taxa de captura média ( <i>tcr</i> )
140	30	150	50%	60%	10%	10%	77,40%
140	30	150	70%	60%	10%	10%	76,80%
130	30	150	90%	70%	10%	10%	76,00%
140	30	150	70%	70%	10%	10%	75,40%
140	30	150	80%	70%	10%	10%	75,20%

Fonte: Elaborado pelo autor.

### 7.3.2 Epidemia, supressão e busca local

Para definir boas parametrizações para os outros operadores do AGFI, foram testadas variações nos parâmetros relativos à epidemia, supressão do espaço de buscas e busca local.

As 5 variações testadas para os parâmetros de epidemia são listadas na tabela 39:

**Tabela 39: Parâmetros relativos à epidemia testados para AGFI quando  $k = 2$  na rede real**

Usar epidemia ( <i>uep</i> )	Gerações sem melhora para ativar a epidemia ( <i>gsa</i> )
Não	-
Sim	{8, 14, 20, 25}

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para os parâmetros relativos à supressão do espaço de busca, foram testadas as 20 variações contidas na tabela 40:

**Tabela 40: Parâmetros relativos à supressão testados para AGFI quando  $k = 2$  na rede real**

Usar supressão ( <i>usp</i> )	Contaminação ( <i>cnt</i> )	Gerações sem melhora para ativar supressão ( <i>gss</i> )	Gerações na lista de supressão ( <i>ges</i> )
Não	-	-	-
Sim	2	5	3
Sim	3	5	3
Sim	4	5	{3, 5}
Sim	5	10	3
Sim	5	15	{5, 10}
Sim	6	5	5
Sim	8	5	5
Sim	10	10	{3, 5}
Sim	10	15	{5, 10}
Sim	12	10	5
Sim	14	10	5
Sim	15	10	3
Sim	15	15	{5, 10}
Sim	16	10	5

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para os parâmetros relativos à busca local do AGFI na rede real, as 19 variações da tabela 41 foram testadas:

**Tabela 41: Parâmetros relativos à busca local testados para AGFI quando  $k = 2$  na rede real**

Usar busca local ( <i>usb</i> )	Intervalo da busca local ( <i>ibl</i> )	Indivíduos gerados pela busca local ( <i>igb</i> )	Indivíduos inseridos na população ( <i>iip</i> )
Não	-	-	-
Sim	3	5	{1, 3}
Sim	5	5	{1, 3}
Sim	3	10	{3, 5}
Sim	5	20	{5, 10}
Sim	10	5	{1, 3}
Sim	10	10	{3, 5}
Sim	10	10	{1, 3}
Sim	15	20	{5, 10}
Sim	20	30	10
Sim	10	30	10

Fonte: Elaborado pelo autor.

Após rodadas 100 execuções para cada uma das 1800 variações possíveis referentes ao produto cartesiano das tabelas acima, as 5 melhores parametrizações, segundo *tcr*, foram separadas para rodar 1000 execuções de desempate. Após as 1000 execuções, o melhor *tcr* encontrado foi de 86,70%, obtido para a variação de parâmetros contida na tabela 42:

**Tabela 42: Melhor parametrização encontrada na fase 2 para AGFI quando  $k = 2$  na rede real**

População e gerações	Probabilidades de operadores	Epidemia	Supressão	Busca local	Taxa de captura média ( <i>tcr</i> )
<i>nge</i> = 150 <i>tpp</i> = 140 <i>tpe</i> = 30	<i>fcr</i> = 80% <i>fpc</i> = 70% <i>tmt</i> = 10% <i>psi</i> = 10%	<i>uep</i> = Sim <i>gsa</i> = 8	<i>usp</i> = Não <i>cnt</i> = - <i>gss</i> = - <i>ges</i> = -	<i>usb</i> = Sim <i>ibl</i> = 5 <i>igb</i> = 5 <i>iip</i> = 3	86,70%

Fonte: Elaborado pelo autor.

A taxa de captura de 86,70% foi obtida com a varredura de, em média, 1,62% do espaço de busca. Com o intuito de melhorar a taxa de captura, uma nova rodada de testes, desta vez composta por testes empíricos, foi realizada. A medida que os testes empíricos foram realizados, notou-se melhora na taxa de captura com a utilização de populações maiores (acima de 400 indivíduos). Para reduzir a varredura do espaço de buscas, aumentou-se a população elite, sempre variando entre 80 e 90% do tamanho da população. Novos testes empíricos foram realizados, desta vez utilizando tamanhos de população maiores ainda. Após encontrar uma parametrização que se destacava com 30 execuções, foram rodadas 1000 execuções para averiguar a taxa de média de captura. Uma taxa média de captura de 99,48%, as expensas de uma varredura média de 3,86% do espaço de busca, foi encontrada e escolhida. A parametrização escolhida para AGFI foi capaz de, em 949 das 1000 execuções, encontrar o ótimo global. A parametrização escolhida para os testes no AGFI é ilustrada na tabela 43:

**Tabela 43: Melhor parametrização encontrada para AGFI quando  $k = 2$  na rede real**

População e gerações	Probabilidades de operadores	Epidemia	Supressão	Busca local	Taxa de captura média ( <i>tcr</i> )
<i>nge</i> = 260 <i>tpp</i> = 1000 <i>tpe</i> = 900	<i>fcr</i> = 85% <i>fpc</i> = 100% <i>tmt</i> = 1% <i>psi</i> = 5%	<i>uep</i> = Não <i>gsa</i> = -	<i>usp</i> = Não <i>cnt</i> = - <i>gss</i> = - <i>ges</i> = -	<i>usb</i> = Sim <i>ibl</i> = 5 <i>igb</i> = 4000 <i>iip</i> = 5	99,48%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Embora a busca local tenha sido largamente ampliada, ela não gera uma varredura excessiva do espaço de buscas, pois seu mecanismo de funcionamento consiste em cruzar os primeiros registros da população elite com os outros registros subsequentes, através da troca de ramos. Como ao longo das gerações existe alta similaridade entre os indivíduos da população elite, a busca local gera intensificação, o que é desejado para um mecanismo de busca local. Tendo em vista que resultados do FCDR já obtidos são reaproveitados, e o alto grau de repetição dos indivíduos testados, a busca local é eficiente mesmo calculando muitos casos.

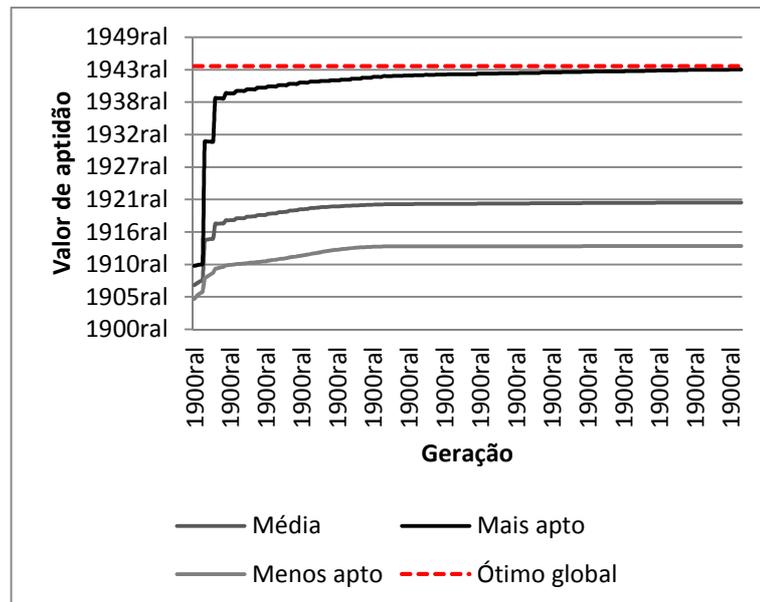
### 7.3.3 Resultados de AGFI na rede real para contingências de ordem $k = 2$

Para a obtenção dos resultados completos do AGFI na rede real, foram rodadas, novamente, 1000 execuções do AGFI, utilizando a melhor parametrização encontrada (tabela 40).

Em 949 das 1000 rodadas testadas o AGFI encontrou a contingência mais grave segundo *ISGFI*, sendo que a taxa média de captura para as 1000 execuções foi de 99,48%.

No gráfico 8 são mostradas as curvas de evolução da função de aptidão dos indivíduos da população de retorno. As curvas descrevem, geração a geração, a média do valor de aptidão do melhor e do pior indivíduo da população de retorno, bem como da média da aptidão dos indivíduos da população de retorno. É possível notar que, em média, a partir da 11ª geração o valor médio da aptidão do melhor indivíduo encontrado foi de 14231,25, sendo que os dois casos mais graves contabilizam 16220,42 e 12014,89, respectivamente.

**Gráfico 8: Evolução da aptidão da população de retorno para AGFI quando  $k = 2$  na rede real**

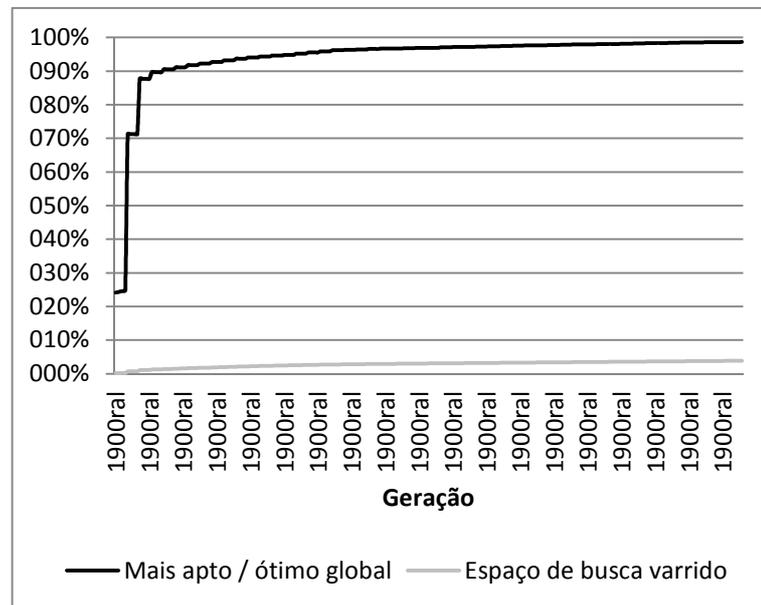


Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados obtidos mostram uma curva de crescimento do valor médio da função de aptidão ao longo das gerações, o que é esperado em problemas de otimização com funções objetivo de maximização. É possível notar também, no gráfico 8, que a busca local levou a uma rápida evolução do valor médio de aptidão do melhor indivíduo da população de retorno.

Para uma avaliação da varredura do espaço de busca, foi elaborado o gráfico 9, que mostra a curva de evolução do valor de aptidão do melhor indivíduo da população de retorno em relação ao ótimo global. Outra curva mostra a evolução do percentual de varredura do espaço de busca:

**Gráfico 9: Evolução da média do mais apto e evolução da varredura do espaço de busca para AGFI quando  $k = 2$  na rede real**



Fonte: Elaborado pelo autor.

O tempo médio de execução foi calculado utilizando uma amostra de 10 execuções. A média do tempo de execução do AGFI para contingências de ordem  $k = 2$  na rede real foi de 39 m 26 s, com um desvio padrão de 1 m 39 s.

#### 7.4 Testes e resultados de AGTn para a rede real e contingências de ordem $k = 2$

Nesta seção são apresentadas as combinações de parâmetros testadas para o AGTn quando utilizado para encontrar contingências graves de ordem  $k = 2$  na rede real.

##### 7.4.1 Tamanho de população e probabilidade dos operadores

Para definir um tamanho de população adequado ao AGTn, foram testadas as mesmas variações de parâmetros testadas para o AGFI e contidas nas tabelas 36 e 37.

Para as 1750 variações possíveis, foram rodadas 100 execuções do AGTn, e as parametrizações que continham o  $tcr$  médio mais alto foram listadas na tabela 44 e escolhidas para a próxima etapa de teste de parâmetros:

**Tabela 44: Melhores parametrizações encontradas na fase 1 para AGTn quando  $k = 2$  na rede real**

Tamanho da população ( <i>tpp</i> )	Tamanho da população elite ( <i>tpe</i> )	<i>nge</i>	Frequência de cruzamento ( <i>fcr</i> )	Frequência de cruzamento por pontos de corte ( <i>fpc</i> )	Taxa de Mutação ( <i>tmt</i> )	Probabilidade de seleção igualmente dividida ( <i>psi</i> )	Taxa de captura média ( <i>tcr</i> )
140	30	150	60%	50%	10%	10%	61,00%
140	35	125	90%	60%	10%	10%	60,60%
130	30	150	80%	50%	10%	10%	59,40%
140	35	125	70%	70%	3%	10%	59,00%
150	35	100	60%	60%	10%	10%	58,80%

Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 7.4.2 Epidemia, supressão e busca local

Para definir boas parametrizações para os outros operadores do AGTn, foram testadas variações nos parâmetros relativos à epidemia, supressão do espaço de busca e busca local. Os valores variados foram idênticos aos testados para o AGFI e contidos nas tabelas 39, 40 e 41.

Após a execução de 100 rodadas para cada uma das 1800 variações possíveis referentes ao produto cartesiano das tabelas 39, 40 e 41, as 5 melhores parametrizações segundo *tcr* foram separadas para rodar mais 1000 execuções de desempate. Após as 1000 execuções, o melhor *tcr* encontrado foi de 69,00%, obtido para a variação de parâmetros contida na tabela 45:

**Tabela 45: Melhor parametrização encontrada na fase 2 para AGTn quando  $k = 2$  na rede real**

População e gerações	Probabilidades de operadores	Epidemia	Supressão	Busca local	Taxa de captura média ( <i>tcr</i> )
<i>nge</i> = 150 <i>tpp</i> = 140 <i>tpe</i> = 30	<i>fcr</i> = 90% <i>fpc</i> = 60% <i>tmt</i> = 10% <i>psi</i> = 10%	<i>uep</i> = Sim <i>gsa</i> = 8	<i>usp</i> = Não <i>cnt</i> = - <i>gss</i> = - <i>ges</i> = -	<i>usb</i> = Sim <i>ibl</i> = 5 <i>igb</i> = 20 <i>iip</i> = 5	69,00%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com o intuito de melhorar a taxa de captura, uma nova rodada de testes, desta vez composta por testes empíricos, foi realizada. A medida que os testes empíricos foram realizados, notou-se melhora na taxa de captura com a utilização de populações menores ao longo de uma maior quantidade de gerações. Para aumentar a taxa de captura, a busca local foi introduzida. Notou-se que buscas com um intervalo de gerações menor do que 30 estavam impedindo o AGTn de manter diversidade populacional. Aumentou-se o tempo entre as buscas locais, e a taxa de captura foi ampliada. Esta configuração obteve taxas de captura acima de 90% as expensas da varredura de cerca de 4% do espaço de buscas. Para aumentar a taxa de captura, optou-se pela introdução da epidemia. Após encontrar uma parametrização que se destacava com 30 execuções, foram rodadas 1000 execuções para averiguar a taxa

média de captura. Uma taxa média de captura de 95,79%, as expensas de uma varredura média de 6,70% do espaço de busca, foi encontrada e escolhida. A parametrização escolhida para os testes no AGTn é ilustrada na tabela 46:

**Tabela 46: Melhor parametrização encontrada para AGTn quando  $k = 2$  na rede real**

População e gerações	Probabilidades de operadores	Epidemia	Supressão	Busca local	Taxa de captura média ( <i>tcr</i> )
nge = 9000 tpp = 45 tpe = 9	fcr = 90% fpc = 80% tmt = 12% psi = 45%	uep = Sim gsa = 80	usp = Não cnt = - gss = - ges = -	usb = Sim ibl = 40 igb = 30 iip = 5	95,79%

Elaborado pelo autor.

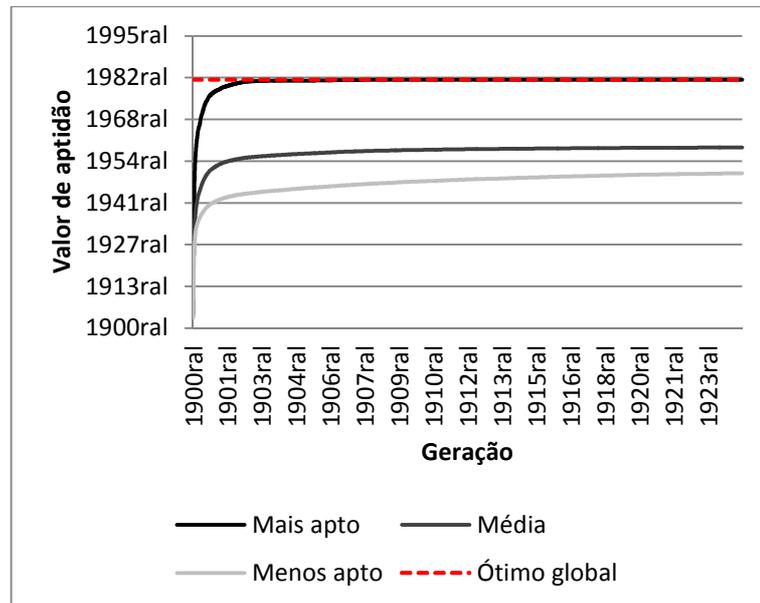
#### 7.4.3 Resultados de AGTn na rede real para contingências de ordem $k = 2$

Para a obtenção dos resultados completos do AGTn na rede real, foram rodadas, novamente, 1000 execuções do AGTn, utilizando a melhor parametrização encontrada (tabela 43)

Em 999 das 1000 execuções o AGTn encontrou a contingência mais grave segundo *ISGv*, sendo que a média da taxa de captura para as 1000 rodadas foi de 95,79%.

No gráfico 10, são mostradas as curvas de evolução da função de aptidão dos indivíduos da população de retorno. As curvas descrevem, geração a geração, a média do valor de aptidão do melhor e do pior indivíduo da população de retorno, bem como da média da aptidão dos indivíduos da população de retorno. É possível notar que, em média, a partir da 3032ª geração o valor médio de aptidão do melhor indivíduo encontrado foi de 29738,3027, próximo ao ótimo global de 29766,1914.

**Gráfico 10: Evolução da aptidão da população de retorno para AGTn quando  $k = 2$  na rede real**

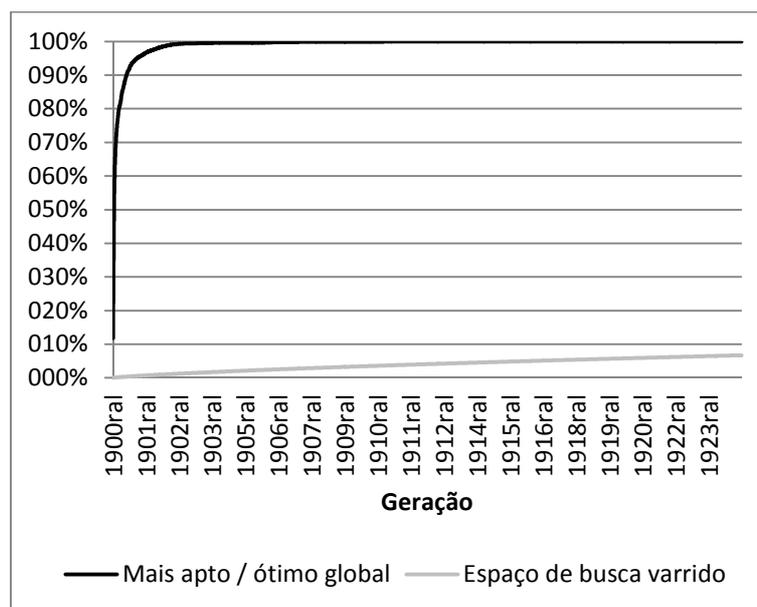


Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados obtidos mostram uma curva de crescimento do valor médio da função de aptidão ao longo das gerações, o que é esperado em problemas de otimização com funções objetivo de maximização.

Para uma avaliação da varredura do espaço de busca, foi elaborado o gráfico 11, que mostra a curva de evolução do valor médio de aptidão do melhor indivíduo da população de retorno em relação ao ótimo global. Outra curva mostra a evolução do percentual de varredura do espaço de busca:

**Gráfico 11: Evolução da média do mais apto e evolução da varredura do espaço de buscas para AGTn quando  $k = 2$  na rede real**



Fonte: Elaborado pelo autor.

O tempo médio de execução foi calculado utilizando uma amostra de 10 execuções. A média do tempo de execução do AGTn, para contingências de ordem  $k = 2$ , na rede real, foi de 01 h 09 m 33 s, com um desvio padrão de 03 m 03 s.

## 7.5 Conclusões dos testes na rede real

É importante verificar que o AGFI e o AGTn foram capazes de, em média, para contingências de ordem  $k = 2$ , encontrar em 94,9% e 99,9% das vezes a contingência mais grave (ótimo global) segundo os índices *ISGFI* e *ISGV*, respectivamente.

Na tabela 47 consta um resumo dos resultados obtidos para o AGFI na rede real de 810 barras e 1340 ramos:

**Tabela 47: Resultados obtidos para o AGFI na rede real**

Rede	Ordem	AGFI			
		Captura média em 1000 rodadas	Método Clássico	Rodadas onde encontrou o ótimo global	Espaço de busca varrido ao fim do AG
810 barras	$k = 2$	99,48%	FCDR	949	3,86%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na tabela 48 há um resumo dos resultados obtidos para o AGTn:

**Tabela 48: Resultados obtidos para o AGTn na rede real**

Rede	Ordem	AGTn			
		Captura média em 1000 rodadas	Método Clássico	Rodadas onde encontrou o ótimo global	Espaço de busca varrido ao fim do AG
810 barras	$k = 2$	95,79%	FCDR	999	6,70%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os testes mostraram também que a taxa média de captura foi de 99,48 e 95,79% em comparação ao método clássico utilizando os índices *ISGFI* e *ISGV* sobre o FCDR.

Na seção de características da rede real de 810 barras e 1340 ramos, é visto que o topo da lista de contingências mais graves sob o prisma de violações de potência ativa nos ramos difere bastante do topo da lista das contingências mais graves sob o prisma de violações de tensão nas barras. Esse fato sugere ser mais seguro testar as parametrizações dos dois AG de forma separada.

Para *ISGFI*, é possível notar que 7 das 10 contingências de ordem  $k = 2$  mais graves envolvem a saída de operação do ramo que liga as barras 992 e 993. Isso mostra a importância de uma busca local eficaz, e, novamente, de uma codificação que gere similaridade entre contingências que envolvam o mesmo ramo. O mesmo comportamento ocorre nas contingências avaliadas sob o prisma de *ISGV*. É possível notar que o ramo que liga as barras 763 e 762, bem como o ramo que liga as barras 739 e 732, aparecem, cada um, em 5 das 10 contingências mais graves. Esta característica da rede mostra que, uma

codificação do cromossomo que mantenha a mesma cadeia de *bits* para representar um mesmo ramo, tende a encontrar bons resultados também nesta rede.

Nims, El-Keib & Smith (1997) dizem em seu trabalho que a busca local melhorou os resultados do AG por eles empregado. Este comportamento repetiu-se para os testes realizados em contingências de ordem  $k = 2$  neste trabalho, tanto para a rede real quanto para a rede IEEE30. Esse comportamento faz sentido quando a similaridade entre as contingências mais graves é observada.

Ao comparar AGFI e AGTn, é possível perceber que a melhor parametrização encontrada para AGFI obteve uma varredura final média do espaço de busca cerca de 43% menor. Mesmo com uma menor varredura final média do espaço de busca, o AGFI obteve uma taxa média de captura cerca de 4% maior. Comparando os tempos obtidos por AGFI e AGTn, notamos que essa eficiência é refletida no tempo de execução das duas parametrizações: AGFI levou, em média, cerca de 39 minutos para rodar, enquanto que AGTn levou, em média, cerca de 69 minutos.

A varredura do espaço de busca é fator crítico de sucesso em AGFI e AGTn, pois o cálculo do FCDR consome mais recursos computacionais do que a evolução dos AG em si. Embora a parametrização do AGFI tenha gerado melhores resultados, isso não garante, sob hipótese alguma, que não haja melhores parametrizações para AGTn.

Os resultados foram muito satisfatórios para esta rede real, e justificam mais estudos dos AG aplicados a problemas de Seleção de Contingências, tanto para redes maiores, quanto para contingências de ordem  $k > 2$ .

## 8 CONCLUSÃO

Grande parte dos sistemas produtivos e serviços dos quais necessitamos enquanto sociedade, dependem 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 proteger-se deles através de ações de controle são tarefas importantes para a execução da Análise de Segurança.

Partindo de que a avaliação de todas as contingências possíveis em um Sistema Elétrico de Potência de grande porte é impraticável devido às severas restrições de tempo impostas à Análise de Segurança, diversas abordagens têm sido elaboradas e testadas nas últimas décadas. Durante a extensa revisão bibliográfica realizada, foram vistos trabalhos nas áreas de matemática aplicada, otimização combinatória e também inteligência artificial, pois o tamanho das redes elétricas atuais e suas características de operação tornam o problema de difícil tratamento computacional.

Neste trabalho buscou-se estudar o uso dos AG com o objetivo de fornecer uma lista de contingências graves sob os pontos de vista de violações de fluxo de potência ativa e violações de tensão nas barras quando da ocorrência de contingências múltiplas de ramo. A escolha do AG foi baseada na grande capacidade desta metaheurística de varrer espaços de busca não lineares e não convexos a fim de localizar boas soluções para problemas de otimização. Os Algoritmos Genéticos são largamente utilizados em problemas de otimização, e também há trabalhos que os utilizam em problemas de otimização na área de Sistemas Elétricos de Potência. Entretanto, na revisão bibliográfica realizada, poucos AG foram utilizados para a etapa de Seleção de Contingências, e, dentre os trabalhos encontrados, nenhum deles havia testado violações de fluxo de potência ativa e violações de tensão nas barras em redes reais de grande porte.

Para que os AG fossem efetivos em encontrar as contingências mais graves, fez-se necessário buscar na literatura um método confiável de avaliação de quão grave uma contingência de ramo é. Diversos métodos foram estudados, e a literatura revisada aponta que os métodos de triagem (*screening*) evitam o mascaramento, o que os torna confiáveis. Embora os métodos de triagem sejam eficazes, eles dependem do cálculo de um Fluxo de Potência, o que demanda certo esforço computacional.

Tendo em vista a necessidade de um compromisso entre eficiência e confiabilidade para a 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 dos AG foi testada neste trabalho em duas redes. A rede IEEE30 é uma rede largamente utilizada para testes em trabalhos da área, enquanto que a rede de 810 barras e 1340 ramos é uma rede real de grande porte. Para medir a eficácia do método, o conceito de taxa de captura foi utilizado. Para medir a eficiência, os tempos de computação do método foram obtidos para a execução nas duas redes.

Os AGFl 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 ou mesmo melhorias na codificação dos cromossomos. Além disso, os AGFl e AGTn cumpriram com seu papel de

reduzir a quantidade de contingências avaliadas, pois na rede real em contingências de ordem  $k = 2$ , em média, apenas 6,70% e 3,86% das contingências possíveis foram avaliadas na rede real.

Embora bons resultados tenham sido obtidos, há espaço para melhorias em trabalhos futuros.

Primeiramente, faz-se necessário o teste dos AG em outras redes reais de grande porte, com vistas a avaliar se as taxas de captura e as características do problema são mantidas, principalmente sobre condições variadas de carga. Um primeiro trabalho futuro deve testar uma mesma parametrização dos AG para variadas condições de carga da rede. Mantendo-se as boas taxas de captura obtidas para a rede real, estudos podem ser realizados para reduzir a varredura do espaço de buscas e assim aumentar a eficiência do método.

Com base nos dados avaliados, percebe-se que, nas redes avaliadas, boa parte das contingências de ordem  $k = 2$  continham ramos também graves em contingências de ordem  $k = 1$ . Explorar essa característica pode ser uma forma de criar boas populações iniciais ou mesmo soluções de busca local que façam os AG convergirem mais rapidamente.

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, além de, possivelmente, melhorar as taxas de captura obtidas para contingências de ordem  $k = 1$ . Nesse caso um fator complicador deve ser sobrepujado: A possível geração de uma grande quantidade de cromossomos inválidos, tendo em vista que cada barra é ligada com outras poucas barras. A alteração dos operadores de cruzamento pode evitar este problema. Outra forma de aproveitar esta característica seria basear a busca local em uma heurística (ou metaheurística) que leve em conta as barras ligadas aos ramos.

Com vistas a aumentar a eficiência dos AGFl e AGTn, estudos relativos a paralelização dos AG podem ser conduzidos. Embora o tempo médio de execução dos AG testados seja bom, a paralelização do método pode permitir a sua execução em um tempo menor, permitindo o seu uso em ambientes de operação.

Para tornar os AG mais completos, pode-se adicionar a eles uma técnica de detecção exata de desconexões, bem como a técnica de ordenação da gravidade dessas desconexões através da sobreposição de ramos fictícios (CANTO DOS SANTOS e GARCIA, 1998).

Além das possíveis melhorias nos AG, um estudo sobre a Busca Tabu (GLOVER e KOCHENBERGER, 2003), aplicada como mecanismo de busca local dos AG, pode conduzir a resultados ainda melhores.

## REFERÊNCIAS

- ABIDO, M. A. Optimal power flow using particle swarm optimization. **International Journal of Electrical Power and Energy Systems**, v. 24, p. 563-571, Outubro 2002. ISSN 0142-0615.
- ALBUQUERQUE, M. D. A. **Seleção de contingências com relação a estabilidade de tensão para análise de segurança em tempo real**. Campinas, SP. 2005.
- ALMEIDA, S.; PESTANA, R. **Definição e análise de contingências severas na Rede Elétrica Portuguesa**. 9º Congresso Hispano-Luso de Engenharia Electrotécnica. Marbella, Espanha: FEUP. 2005. p. 1-9.
- AURICH, M. R. C. **Um Modelo de Fluxo de Potência Ótimo Linear com Reprogramação Corretiva Via Método de Pontos Interiores**. Campinas, SP. 2004.
- BALU, N. et al. On-Line Power System Security Analysis. **Proceedings of IEEE**, Vol.80, p. 262-280, 1992.
- BRANDWAJN, V. Efficient bounding method for linear contingency analysis. **IEEE Transactions on Power Systems**, Vol. 3, No. 1, p. 38-43, 1988.
- CANTO DOS SANTOS, J. V.; GARCIA, A. V. Tratamiento de contingencias que causan desconexiones em sistemas electricos de. **Información Tecnológica**, v. 9, n. 6, 1998.
- CARPENTIER, J. **STATIC SECURITY ASSESSMENT AND CONTROL: A SHORT SURVEY**. IEF/NTUA Athens Power Tech Conference: "Planning, Operation and Control of Today's Electric Power Systems". Atenas, Grécia: IEEE. 1993. p. 1-9.
- CEPEL. **ANAREDE V08/Ago04 – Manual do usuário**. Brasil. 2004.
- CHAKRABARTI, S.; JEYASURYA, B. Multicontingency voltage stability monitoring of a power system using an adaptive radial basis function network. **Electrical Power and Energy Systems** 30, p. 1-7, 2008.
- CHEN, S. Open Design of Networked Power Quality Monitoring Systems. **IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT**, Vol. 53, p. 597-601, 2004.
- CHEN, Y.; BOSE, A. Direct Ranking for Voltage Contingency Selection. **IEEE Transactions on Power Systems**, Vol. 4, No. 4, p. 1335-1344, 1989.
- CHIEN, S. E. et al. **Automation of Contingency Analysis for Special Protection Systems in Taiwan Power System**. International Conference on Intelligent Systems Applications to Power Systems. Niigata, Japão: IEEE. 2007. p. Shih-En Chien, I-Ta Cheng, Yi-Ting Chou and Chih-Wen Liu.
- CIHLAR, T. C. **Electric utility system security, Chicago, 1969**. American Power Conference. Chicago: IEEE. 1969.
- COSTA, A. S.; LEÃO, J. A. IDENTIFICATION OF TOPOLOGY ERRORS IN POWER SYSTEM STATE ESTIMATION. **IEEE Transaction On Power Systemas**, Vol. 8, p. 1531-1538, 1993.
- DE JONG, K. A. A. A. O. T. B. O. A. C. O. G. A. S. D. D. U. O. M. A. A. M. **An analysis of the behavior of a class of genetic adaptative systems**. Doctoral dissertation. Ann Arbor, Michigan. 1975.
- DEVARAJ, D.; YEGNANARAYANA, B.; RAMAR, K. Radial basis function networks for fast contingency ranking. **Electrical Power and Energy Systems**, 24, p. 387-395, 2002.

- DINU, S.; ODAGESCU, I.; MOISE, M. Environmental Economic Dispatch Optimization using a Modified Genetic Algorithm. **International Journal of Computer Applications (0975 – 8887)**, Vol. 20, p. 7-14, 2011.
- DIRECTOR, S. W.; ROHRER, R. A. The Generalized Adjoint Network and Network Sensitivities. **IEEE TRANSACTIONS ON CIRCUIT THEORY, VOL. CT-16, No. 3**, p. 318-323, 1969.
- DOBRIJEVIC, D. M.; POPOVIC, D. P. An Unified External Network Equivalent in Steady-State Security Assessment. **ELEC. ENERG.** vol. 23, p. 179-189, 2010.
- DOMMEL, H. W.; TINNEY, W. F. Optimal Power Flow Solutions. **IEEE TRANSACTIONS ON POWER APPARATUS AND SYSTEMS, Vol. PAS-87**, p. 1866-1876, 1968.
- DOPAZO, J. F. et al. An external system equivalent model using real-time measurements for System Security evaluation. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS96**, p. 431-446, 1977.
- DY LIACCO, T. E. The Adaptive Reliability Control System. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol. PAS-86**, p. 517-531, 1967.
- EJEBE, G. C.; WOLLENBURG, B. F. Automatic contingency selection. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, p. 97-103, 1979.
- EWART, D. N.; KIRCHMAYER, L. K. Automation and utility system security. **IEEE Spectrum**, p. 37-42, 1971.
- FRANCISCO, G. D. S. **Avaliação de Ferramentas de Análise de Estabilidade de Tensão**. Itajubá, MG. 2005.
- GALIANA, F. D. Bound estimates of the severity of line outages in power system contingency analysis and ranking. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, No. 9**, p. 2612-2624, 1984.
- GERHARDT, R. A. **Um Sistema Computacional Para Análise De Segurança em Sistemas Elétricos de Potência**. São Leopoldo. 2007.
- GLOVER, F.; KOCHENBERGER, G. A. **Handbook of Metaheuristics**. Norwell, MA: Kluwer Academic Publishers, 2003.
- GOLDBERG, D. E. **Optimal Initial Population Size for Binary-Coded Genetic Algorithms**. Tuscaloosa. 1985.
- GOLDBERG, D. E. **Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning**. Reading, Massachusetts: Addison-Wesley, 1989.
- GRFENSTETTE, J. J. Optimization of Control Parameters for Genetic Algorithms. **IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics**, v. 16, p. 122-128, Janeiro 1986.
- GUERRA, A. F. **Seleção de contingências para violações de MW em ramos de sistemas elétricos de potência utilizando abordagem multinível adaptativa**. Campinas, SP. 2002.
- HERTZ, A.; WILDMER, M. Guidelines for use of meta-heuristics in combinatorial optimization. **European journal of Operation Research 151**, p. 247-252, 2003.
- HOLLAND, J. **Adaptation in Natural and Artificial Systems**. Cambridge, MA: MIT Press, 1992.
- IRISSARI, G.; SASSON, A. M.; LEVNER, D. Automatic contingency selection for on-line security analysis - real time tests. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-98, No.5**, p. 1552-1559, 1979.

- JOHNSON, D. E. **Fundamentos de análise de circuitos elétricos**. New Jersey: Prentice Hall, 1990.
- JOYA, G.; LAGOS, F. G.; SANDOVAL, F. Contingency evaluation and monitorization using artificial neural networks. **Neural Comput & Applic**, p. 139-150, 2010.
- KABOURIS, J. et al. **Voltage Security Considerations in an Open Power Market**. International Conference on Electrical Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies. London, UK: IEEE. 2000. p. 278-283.
- KUMAR, V. S.; MOHAN, M. R. Solution to security constrained unit commitment problem using genetic algorithm. **Electrical Power And Energy Systems** **32**, p. 117-125, 2010.
- KUNDUR, P. et al. Definition and Classification of Power System Stability. **IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, VOL. 19**, p. 1387-1401, 2004.
- LARSON, R.; FARBER, B. **Estatística aplicada**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2007.
- LOBO, F. G.; LIMA, C. F. **A Review of Adaptive Population Sizing Schemes in Genetic Algorithms**. GECCO2005. Washington, DC, USA: ACM. 2005. p. 228-234.
- MAN, K. F.; KWONG, S. **Genetic algorithms: concepts and designs**. London, UK: Springer, 1999.
- MEDEIROS, F. L. L. **Algoritmo Genético Híbrido como um método de busca de estados estacionários de sistemas dinâmicos**. **Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Computação Aplicada**. São José dos Campos, SP. 2002.
- MELIPOULOS, A. P. S.; CHENG, C. S.; XIA, F. Performance Evaluation of Static Security Analysis Methods. **IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, No. 3**, p. 1441-1449, 1994.
- MENG, Z. J.; XUE, Y.; LO, K. L. **A New Approximate Load Flow Calculation Method for Contingency Selection**. Power Systems Conference and Exposition. Atlanta, Georgia: IEEE. 2006. p. 1601-1605.
- MENG, Z. J.; XUE, Y.; LO, K. L. **An Approximate Load Flow Calculation Method for the Contingency Selection of Double Transmission Line Outage**. The International Conference on Electrical Engineering. Shenyang, China: [s.n.]. 2009.
- MITCHELL, M. **An Introduction to Genetic Algorithms**. London, England: MIT Press, 1996.
- MONTICELLI, A. **Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica**. São Paulo: Edgard Blücher, 1983. 164 p.
- MONTICELLI, A.; PEREIRA, M. V. F.; GRANVILLE, S. Security-Constrained Optimal Power Flow with Post-Contingency Corrective Rescheduling. **IEEE Transactions On Power Systems, Vol. PWRS-2, No 1**, p. 175-180, 1987.
- MOURA, A. P. D.; MOURA, A. A. F. D. **Fluxo de Potência Newton-Raphson Desacoplado com matrizes constantes de susceptância e de condutância**. XVIII Congresso Brasileiro de Automática. Bonito, MS: [s.n.]. 2010. p. 332-339.
- NIMS, J. W.; EL-KEIB, A. A.; SMITH, R. E. Contingency ranking for voltage stability using a genetic algorithm. **Electric Power Systems Research** **43**, p. 69-76, 1997.
- OLIVEIRA, S. **Metaheurísticas Aplicadas ao Planejamento da Expansão da Transmissão de Energia Elétrica em Ambiente de Processamento Distribuído**. Campinas, SP. 2004.
- OOKA, R.; KOMAMURA, K. Optimal design method for building energy systems using genetic algorithms. **Building and Environment** **44**, p. 1538-1544, 2009.

- PANDA, S.; PADHY, N. P. Comparison of particle swarm optimization and genetic algorithm for FACTS-based controller design. **Applied Soft Computing** **8**, p. 1418-1427, 2008.
- PAPADIMITRIOU, C.; KENETH, S. **Combinatorial optimization: algorithms and complexity**. Mineola: Dover, 1998.
- PEZZINI, P.; GOMIS-BELLMUNT, P.; SUDRIÀ-ANDREU, A. Optimization techniques to improve energy efficiency in power systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** **15**, p. 2028-2041, 2011.
- PHAM, T.; KARABOGA, D. **Intelligent optimisation techniques: genetic algorithms, tabu search, simulated annealing and neural networks**. London, England: Springer, 2000.
- QUINTELA, A. **Estudo de índices de proximidade ao limite de estabilidade de tensão e aplicação na seleção de contingências**. Campinas, SP. 2002.
- REEVES, C. R. **Using genetic algorithms with small populations**. Proceedings of 5th International Conference of Genetic Algorithms. San Mateo, CA: S. Forrest. 1993. p. 92-99.
- SAITOH, H.; TAKANO, Y.; TOYODA, J. Genetic Algorithm-Based Method for Contingency Screening in Power Systems. **Electrical Engineering in Japan, Vol. 116, No. 2**, p. 99-111, 1996.
- SCHAFFER, D. et al. **A study of control parameters affecting online performance of genetic algorithms for function optimization**. Proceedings of the Third International Conference on Genetic Algorithms. Los Altos, CA: Morgan Kaufmann. 1989. p. 51-60.
- SCHULZ, R. P.; PRICE, W. W. Classification and identification of power system emergencies. **IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103**, p. 3471-3479, 1984.
- SILVA JÚNIOR, I. D. J. **Planejamento da Expansão de Sistemas de Transmissão Considerando Segurança e Planos de Programação da Geração**. Campinas, SP. 2005.
- SPEARS, W. M.; DEJONG, K. **An analysis of multi-point crossover**. **Foundations of Genetic algorithms**. G.J.E: Rawlins, 1991.
- SRIVANI, J.; SWARUP, K. S. Power system static security assessment and evaluation using external system equivalents. **Electrical Power and Energy Systems, 30**, p. 83-92, 2008.
- STOTT, B.; ALSAC, O. **Fast Decoupled Load Flow**. IEEE PES Summer Meeting & EHV/UHV Conference. Vancouver, B.C. Canada: IEEE. 1973. p. 859-868.
- STOTT, B.; ALSAC, O.; MONTICELLI, A. Security Analysis and Optimization. **PROCEEDINGS OF THE IEEE, VOL. 75**, p. 1623-1644, 1987.
- SUDERSAN, A.; ABDELRAHMAN, M.; RADMAN, G. **Contingency Selection and Static Security Enhancement in Power Systems using Heuristics-based Genetic Algorithms**. Proceedings of the Thirty-Sixth Southeastern Symposium on System Theory. Atlanta, Georgia: IEEE. 2004. p. 556-560.
- TINNEY, W. F.; HART, C. E. Power Flow Solution by Newton's Method. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, p. 1449-1460, 1967.
- TOMSOVIC, K. Designing the Next Generation of Real-Time Control, Communication, and Computations for Large Power Systems. **PROCEEDINGS OF THE IEEE. Vol 93**, p. 965-979, 2005.
- VUONG, M. H.; LEFEBVRE, S.; DO, X. D. **Detection and estimation of topology and parameter errors from real-time measurements**. Power Engineering Society Summer Meeting. Chicago: IEEE. 2002. p. 1565-1569.

- WOLFRAM, S. Wolfram. **Wolfram Alpha knowledgebase**, 2012. Disponível em: <<http://www.wolframalpha.com/input/?i=APPROXIMATELY+EQUAL+TO+OR+THE+IMAGE+OF>>. Acesso em: 25 mar. 2012.
- ZABORSKY, J.; WHANG, K. W.; PRASAD, K. Fast Contingency Evaluation Using Concentric Relation. **IEEE Transactions on Power and Apparatus Systems**, p. 28-36, 1980.