

**METODOLOGIA PARA OTIMIZAÇÃO DA
RECOMPOSIÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS
BASEADA NA BUSCA TABU SELETIVA
ADAPTATIVA**

ANTÔNIO MAURÍCIO DE MATOS GONÇALVES

CAMPO GRANDE

2007

UNIVERSIDADE FEDERAL DO MATO GROSSO DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA ELÉTRICA

METODOLOGIA PARA OTIMIZAÇÃO DA
RECOMPOSIÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS
BASEADA NA BUSCA TABU SELETIVA
ADAPTATIVA

Dissertação submetida à
Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
como parte dos requisitos para a
obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

ANTÔNIO MAURÍCIO DE MATOS GONÇALVES

Campo Grande, Dezembro de 2007.

METODOLOGIA PARA OTIMIZAÇÃO DA RECOMPOSIÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS BASEADA NA BUSCA TABU SELETIVA ADAPTATIVA

ANTÔNIO MAURÍCIO DE MATOS GONÇALVES

‘Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Inteligência Artificial, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul.’

Luciana Cambraia Leite, Dra.
Orientadora
Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:

Luciana Cambraia Leite, Dra.
Presidente

Wellington Santos Mota, Dr.

Flávio Guilherme de Melo Lima, Dr.

João Onofre Pereira Pinto, Dr.

Dedicatória

A minha esposa, pelo apoio ao longo desta jornada, a minha mãe, por ter me propiciado chegar até aqui, e ao meu pai, que nos deixou tão cedo.

Agradecimentos

Aos professores e colegas do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul pelo suporte e companheirismo.

A Enersul e aos colegas de trabalho pelo incentivo.

A minha família pela torcida e apoio incondicional.

Por fim, a Deus por fazer tudo certo e na hora certa em minha vida.

Resumo da Dissertação apresentada à UFMS como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

METODOLOGIA PARA OTIMIZAÇÃO DA RECOMPOSIÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS BASEADA NA BUSCA TABU SELETIVA ADAPTATIVA

ANTÔNIO MAURÍCIO DE MATOS GONÇALVES

Dezembro / 2007

Orientadora: Luciana Cambraia Leite, Dra.

Área de Concentração: Inteligência Artificial.

Palavras-chave: Busca Tabu, Inteligência Artificial, Otimização, Recomposição de Sistemas Elétricos.

Número de Páginas: 108.

RESUMO: Esta dissertação apresenta uma metodologia de otimização aplicada à recomposição de sistemas elétricos de transmissão, objetivando o desenvolvimento de uma ferramenta de treinamento e de apoio em tempo real aos operadores do Centro de Operação do Sistema. A metodologia proposta, denominada Busca Tabu Seletiva Adaptativa, é baseada na técnica de Busca Tabu, aplicando alguns conceitos da Busca Tabu Reativa. Seu algoritmo agrega uma lista de regras, baseada nas instruções de operação do sistema e no conhecimento dos especialistas, garantindo a execução correta do processo de recomposição. Destaca-se, nesta metodologia, a introdução de elementos semelhantes aos encontrados na técnica de Algoritmos Genéticos, como seleção natural e mutação, implementados através de funções de elitismo e de aleatoriedade, provendo, simultaneamente, intensificação e diversificação à busca. A metodologia desenvolvida é detalhadamente descrita e sua validação é feita através da aplicação na resolução do problema de recomposição de um pequeno sistema elétrico de transmissão.

Abstract of Dissertation presented to UFMS as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Electrical Engineering.

**METHODOLOGY FOR OPTIMIZATION SERVICE
RESTORATION OF ELECTRICAL SYSTEMS BASED
ADAPTIVE SELECTIVE TABU SEARCH**

ANTÔNIO MAURÍCIO DE MATOS GONÇALVES

December / 2007

Advisor: Luciana Cambraia Leite, Phd.

Area of Concentration: Artificial Intelligence.

Keywords: Tabu Search, Artificial Intelligence, Optimization, Transmission Power Systems Restoration.

Number of Pages: 108.

ABSTRACT: This dissertation presents a methodology proposed to optimize the restoration of transmission electrical systems, as well as to develop a tool for training and support, in real time, to the system's operators to the System Operation Center - SOC. The proposed methodology, called Adaptive Selective Tabu Search, is based on the Tabu Search technique and some concepts of the Reactive Tabu Search. Its algorithm adds a list of rules, based on the operation system instructions and on the experts' knowledge, guaranteeing the correct implementation of the restoration process. There is, in this methodology, the introduction of elements similar to those found in the Genetic Algorithms technique, such as natural selection and mutation, implemented through the functions of elitism and randomness, providing both intensification and diversification to the search. The methodology developed is thoroughly described and its validation is done by applying it to solve the restoration problem of a small electric transmission system.

SUMÁRIO

1 -	Introdução.....	1
1.1 -	Definição do problema.....	4
1.2 -	Objetivo	5
2 -	Revisão Bibliográfica	6
2.1 -	Organização do texto	14
3 -	Técnicas de Inteligência Artificial aplicadas ao problema de recomposição de sistemas elétricos.....	16
3.1 -	Busca Tabu	16
3.1.1 -	Memória de curto prazo	17
3.1.2 -	Memória de longo prazo.....	21
3.2 -	Busca Tabu Reativa	22
3.2.1 -	Auto-ajuste do comprimento tabu.....	23
3.2.2 -	Mecanismo de escape	23
3.2.3 -	Gerenciamento dos dados históricos	24
3.3 -	Algoritmos Genéticos	24
3.3.1 -	Representação cromossômica.....	26
3.3.2 -	População	27
3.3.3 -	Seleção	28
3.3.4 -	Operadores Genéticos	30
4 -	Busca Tabu Seletiva Adaptativa.....	35
4.1 -	Introdução	35
4.2 -	Metodologia proposta	38
4.2.1 -	Modelagem do Sistema Elétrico.....	39
4.2.2 -	Regra Tabu	39
4.2.3 -	Critério de Aspiração.....	42
4.2.4 -	Verificação de Borda.....	43
4.2.5 -	Elitismo e Aleatoriedade.....	45
4.2.6 -	Passos Futuros e Realimentação.....	46
4.2.7 -	Auto-calibração	47
4.2.8 -	Função Objetivo	49
4.2.9 -	Apuração dos resultados.....	50
4.2.10 -	Fluxograma da BTSA.....	51
4.2.11 -	Implementação.....	55
5 -	Simulações e Resultados	57
5.1 -	Simulação de casos	57
5.1.1 -	Caso 01 - Jupiá	59
5.1.2 -	Caso 02 – Dourados das Nações e Aquidauana	66
5.1.3 -	Caso 03 – Jupiá, Dourados das Nações e Aquidauana.....	71
5.2 -	Avaliação da aleatoriedade	75
6 -	Conclusões.....	77
	ANEXO 1 – Sistema elétrico estudado (20 barras)	80
	ANEXO 2 – Resumo dos Trabalhos Produzidos.....	81
	ANEXO 3 – Lista de prioridade de subestações	82
	ANEXO 4 – Matriz distância entre subestações.....	83
	ANEXO 5 – Simulação em MATLAB ® do algoritmo implementado.....	84
7 -	Referências Bibliográficas	104

Lista de Figuras

Figura 1.1 - Sistema elétrico do MS (Fonte: ENERSUL)	1
Figura 2.1 – Exemplo de sistema de distribuição	10
Figura 2.2 – Configuração do sistema de distribuição após desligamento	11
Figura 2.3 – Exemplo de sistema de transmissão	11
Figura 2.4 – Resposta do problema para abordagem combinatória	12
Figura 2.5 – Recomposição seqüencial do sistema até a subestação C	13
Figura 2.6 – Recomposição seqüência do sistema até a subestação F	14
Figura 3.1 - Aplicação da lista tabu para escapar de mínimos locais	18
Figura 3.2 - Fluxograma da memória de curto prazo da BT	21
Figura 3.3 - Cromossomo	25
Figura 3.4 - Representação de uma solução possível.....	26
Figura 3.5 - População inicial criada aleatoriamente	27
Figura 3.6 - Dispersão da população em uma geração t.....	28
Figura 3.7 - Roleta para seleção dos indivíduos	29
Figura 3.8 - Exemplo de recombinação com 01 ponto de cruzamento	31
Figura 3.9 - Exemplo de mutação de 01 gene	32
Figura 3.10 - Fluxograma básico dos AG.....	33
Figura 4.1 - Exemplo de recomposição do sistema.....	36
Figura 4.2 - Sistema modelo para aplicação de regras	40
Figura 4.3 - Sistema modelo para aplicação do critério de aspiração	42
Figura 4.4 - Criação da borda de eliminação B	44
Figura 4.5 - Criação da borda de eliminação B + 1	45
Figura 4.6 - Análise de passos futuros e realimentação.....	46
Figura 4.7 - Fluxograma principal BTSA	53
Figura 4.8 - Fluxograma detalhando a análise de passos futuros	54
Figura 4.9 - Estrutura do algoritmo implementado	55
Figura 5.1 - Disponibilidade de fontes de recomposição	57
Figura 5.2 – Condição inicial do caso 01.....	59
Figura 5.3 - Resultado gráfico da recomposição para o caso 01 aplicando a BTSA	60
Figura 5.4 – Exemplo da ramificação da árvore de soluções em uma iteração	62
Figura 5.5 - Resultado gráfico da recomposição para o caso 01 aplicando a BT	63
Figura 5.6 - Resultado gráfico da recomposição para o caso 01 aplicando a BE	65
Figura 5.7 - Comparação dos resultados das técnicas – caso 01	66
Figura 5.8 – Condição inicial do caso 02.....	67
Figura 5.9 - Resultado gráfico da recomposição para o caso 02 aplicando a BTSA	67
Figura 5.10 - Resultado gráfico da recomposição para o caso 02 aplicando a BT	68
Figura 5.11 - Resultado gráfico da recomposição para o caso 02 aplicando a BE	68
Figura 5.12 – Exemplo da ramificação da árvore de soluções em uma iteração	70
Figura 5.13 - Comparação dos resultados das técnicas – caso 02	71
Figura 5.14 – Condição inicial do caso 03.....	72
Figura 5.15 - Resultado gráfico da recomposição para o caso 03 aplicando a BTSA.....	72
Figura 5.16 - Resultado gráfico da recomposição para o caso 03 aplicando a BT	73
Figura 5.17 - Resultado gráfico da recomposição para o caso 03 aplicando a BE	73
Figura 5.18 - Comparação dos resultados das técnicas – caso 03	74
Figura A.1 - Parte do sistema elétrico de sub-transmissão do Estado de Mato Grosso do Sul	80

Lista de Tabelas

Tabela 3.1: Exemplo de seleção.....	28
Tabela 3.2: Resultado da seleção através do método da roleta.....	30
Tabela 5.1 – Eficiência da BTSA por iteração para o caso 01.....	61
Tabela 5.2 – Eficiência da BT por iteração para o caso 01.....	63
Tabela 5.3 – Eficiência da BE por iteração para o caso 01.....	65
Tabela 5.4 – Comparação de eficiência das técnicas por iteração para o caso 02.....	69
Tabela 5.5 – Comparação de eficiência das técnicas por iteração para o caso 03.....	74
Tabela 5.6 – Repetição da simulação de caso para a BTSA.....	75
Tabela A.1: Prioridade de Subestações.....	82
Tabela A.2: Distância entre Subestações.....	83

Lista de Símbolos

- A** – Número inteiro que indica o número de soluções escolhidas por eleição.
- B** - Número inteiro que indica o número de soluções escolhidas aleatoriamente.
- S** – Representação de um cromossomo.
- s** – Representação de um gene.
- w** – Peso da função objetivo.

Lista de Acrônimos

AG - Algoritmos Genéticos
ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica
ASTS - *Adaptive-Selective Tabu Search*
BE – Busca Exaustiva
BT – Busca Tabu
BTP – Busca Tabu Paralela
BTR – Busca Tabu Reativa
BTSA – Busca Tabu Seletiva Adaptativa
COS – Centro de Operação do Sistema
ENERSUL – Empresa Energética de Mato Grosso do Sul
GA – Genetic Algorithms
MLP - *Multi Layer Perceptron*
ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico
PTS – *Parallel Tabu Search*
RBC – Raciocínio Baseado em Casos
RTS – *Reactive Tabu Search*
RNA - Redes Neurais Artificiais
SIN – Sistema Interligado Nacional
TS – *Tabu Search*

1 - Introdução

O Estado de Mato Grosso do Sul, em função de suas características ge-elétricas, tem seu suprimento de energia elétrica baseado em 75 % por fontes externas (Fonte: Enersul - referência ano 2006), através de pontos de intercâmbio de energia com outros estados. Para o transporte desta energia aos centros consumidores, o Estado dispõe na área de concessão da Empresa Energética de Mato Grosso do Sul – ENERSUL, que corresponde a 92 % do Estado, de 3.141,5 quilômetros de linhas de sub-transmissão na tensão de 138 kV.



Figura 1.1 - Sistema elétrico do MS (Fonte: ENERSUL)

O sistema elétrico de Mato Grosso do Sul (Sistema MS), apresentado na Figura 1.1, é um ponto de conexão entre os Subsistemas Sudeste e Sul do SIN. Sua configuração influencia no intercâmbio de energia entre estes Subsistemas como um fator limitador, tendo em vista sua pequena capacidade de transporte de

blocos de energia quando comparado com a demais interligações Sul-Sudeste. Como consequência, o Sistema MS apresenta 14 subestações que integram a Rede de Operação do ONS, bem como as linhas que as interligam. Rede de Operação são as instalações as quais o ONS executa a supervisão e coordenação da operação através de seus centros de operação.

A operação do sistema, portanto, está submetida a uma vasta gama de normas e instruções que especificam os procedimentos a serem seguidos no caso de desligamentos. O instrumento maior desta normatização são os Procedimentos de Rede do ONS, que estabelece os requisitos técnicos necessários ao planejamento, implantação, uso e operação do SIN.

Dentro dos Procedimentos de Rede destaca-se o Módulo 10 – Manual de Procedimentos da Operação. Este módulo é destinado às atividades em tempo real, compreendendo os requisitos básicos para a supervisão, comando e execução da operação do SIN. Contempla ainda as Normas, Rotinas e Instruções a serem seguidas pelos Centros de Operação dos Agentes integrantes do SIN.

A operação do sistema elétrico também está submetida à ANEEL, autarquia responsável pela regulação e fiscalização da produção, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica.

Através da Resolução nº 024 de 27/01/2000 [1], a ANEEL estabelece os critérios relativos à continuidade no fornecimento de energia elétrica pelas distribuidoras, determinando a duração e frequência máxima de interrupções a cada conjunto de consumidores de sua área de concessão.

Já a Resolução nº 505 de 27/11/2001 da ANEEL [2] dispõe sobre a conformidade dos níveis de tensão em regime permanente a serem observados pelo ONS e pelas Distribuidoras no atendimento aos seus consumidores.

Logo, a recomposição do sistema elétrico deve atender os critérios regulatórios determinados pela ANEEL, referentes à continuidade e conformidade

no fornecimento de energia elétrica aos consumidores, evitando assim multas e punições as Distribuidoras e prejuízo aos consumidores.

De maneira geral, a recomposição de um sistema elétrico após blecaute abrange as seguintes etapas:

- ✓ Análise e identificação da localização e causa do blecaute;
- ✓ Isolamento dos equipamentos ou área atingida;
- ✓ Preparação das instalações para recomposição;
- ✓ Recomposição de equipamentos e instalações, dentro dos critérios das instruções e parâmetros de qualidade.

Contrariando sua aparente simplicidade, a recomposição de sistemas elétricos é um processo extremamente complexo, destacando-se como principais fatores complicadores:

- ✓ Estresse psicológico dos operadores – Durante o blecaute, além da pressão psicológica natural, a grande quantidade de alarmes sonoros e visuais e telefonemas elevam o nível de estresse do ambiente;
- ✓ Volume de alarmes – Uma grande quantidade de sinalizações de equipamentos, proteções, medições, etc., algumas essenciais e outras desnecessárias, são apresentadas ao operador em curto espaço de tempo, através do Sistema de Supervisão e Controle – SSC;
- ✓ Volume de regras - As instruções de operação, necessárias ao restabelecimento do sistema, trazem uma grande quantidade de regras a serem obedecidas;
- ✓ Segurança – A preservação da segurança de funcionários, terceiros e instalações são primordiais;
- ✓ Qualidade de energia elétrica - Observância dos critérios estabelecidos pelos órgãos reguladores;
- ✓ Dependência de outros agentes – A recomposição é um processo em cadeia entre diferentes empresas, coordenado pelo ONS;

- ✓ Otimização - Busca incessante pela minimização da duração do desligamento, tendo em vista os impactos sociais e econômicos provocados pela falta de energia.

Fica evidenciada, portanto, a necessidade do desenvolvimento de ferramentas de apoio à operação e recomposição dos sistemas elétricos, fazendo-se valer dos ganhos possíveis através de técnicas computacionais de otimização. Porém, deve-se destacar a figura imprescindível do operador, o qual detém o conhecimento e raciocínio fundamental ao sucesso notório da operação do SIN.

Neste sentido, as empresas do setor elétrico brasileiro e mundial vêm trabalhando, juntamente com renomadas instituições de pesquisa, no desenvolvimento e implantação de sistemas especialistas para treinamento e apoio a tomada de decisão em tempo real nos seus Centros de Operação.

1.1 - Definição do problema

O problema abordado nesta pesquisa é a recomposição de sistemas elétricos de sub-transmissão após blecaute, associado a uma série de regras inerentes do processo, divididas em dois grupos distintos:

- ✓ Técnicas, associadas aos procedimentos internos das empresas, relacionamento entre agentes e a coordenação do ONS, traduzidas através de instruções de operação;
- ✓ Regulatórias, associadas ao agente regulador ANEEL, estabelecidas através de resoluções.

Este problema possui ainda fatores complicadores, pois gera um momento de grande estresse psicológico dos Operadores do sistema, face ao impacto econômico e social resultante da falta de energia elétrica, bem como um grande volume de informações que devem ser analisadas para se efetuar o restabelecimento do sistema.

Sob o ponto de vista matemático, ele pode ser modelado como um problema de seqüenciamento, executado de forma progressiva, ou seja, as ações já adotadas não podem ser desfeitas. Cada ação está submetida ainda a uma série de regras determinísticas.

1.2 - Objetivo

Este trabalho tem como objetivo apresentar uma metodologia de otimização da recomposição de sistemas elétricos de transmissão, baseada em uma técnica de Inteligência Artificial desenvolvida para este problema.

Sua finalidade é tornar-se uma ferramenta de apoio aos Operadores do sistema após desligamentos, sendo responsável pela análise das variáveis e regras envolvidas e sugestão da melhor solução a ser adotada.

2 - Revisão Bibliográfica

Nesta seção são apresentados e discutidos os principais artigos pesquisados durante o desenvolvimento deste trabalho. Estes artigos tratam da aplicação de técnicas de Inteligência Artificial como BT e suas variações, RNA, AG e Sistemas Especialistas na recomposição, realocação de chaves e reconfiguração de sistemas de distribuição e transmissão.

Em geral o objetivo final é a otimização do processo de restauração do sistema após desligamentos. Seus resultados são comparados com outros modelos heurísticos de otimização.

Silva et al [3] apresenta a aplicação do algoritmo de BT ao problema de alocação e realocação de chaves seccionadoras objetivando a minimização dos custos de interrupção do fornecimento de energia elétrica. Sua função objetivo considera a minimização dos custos da energia não suprida em contingências, ou seja, que o menor número de consumidores sejam atingidos, bem como o menor custo de restauração do sistema. É utilizada uma codificação binária para o problema, onde a cada barra do alimentador é associado o número zero se não houver chave ou o número um se houver chave naquele ponto. A alteração de topologia é efetuada por alimentador, alterando-se a primeira chave alocada para a primeira posição que não possui chave, permanecendo as demais inalteradas. A lista tabu, de tamanho fixo, armazena as últimas transições a fim de evitar o retorno à configurações já visitadas. Como critério de aspiração é adotado o valor da função custo para a configuração tabu maior que as cinco últimas configurações visitadas. O critério de parada é definido pelo número máximo de iterações.

Este artigo aborda a alocação e realocação de chaves no sistema de distribuição, notadamente um problema combinatório, sendo a lista tabu responsável por evitar a análise de configurações já visitadas. Logo, para o problema de recomposição do sistema de transmissão, considerado como um

problema de sequenciamento, esta aplicação da BT não é eficaz. A técnica não conseguiria avaliar a evolução do processo ao longo da recomposição, bem como poderiam ser adotadas soluções eletricamente inexistentes, pois não há verificação de regras.

Mori e Ogita [4] apresentam uma metodologia para otimização da reconfiguração de rede para restabelecimento de sistemas de distribuição através da BTP (PTS). O serviço de restabelecimento é abordado como um problema combinatório, em que se procura minimizar as cargas desligadas após desligamentos através do balanceamento entre carga e fonte utilizando-se chaves seccionadoras. A metodologia proposta é uma variação da BT, denominada BTP, que propõe um ganho no tempo de processamento e melhoria da resposta. A estratégia utilizada é a decomposição da vizinhança de soluções, sendo avaliada cada subvizinhança através de processamento paralelo. Outra estratégia empregada é a multiplicidade do comprimento tabu, provendo diversificação e refinamento à busca. Foram efetuadas simulações comparando a BTP com as técnicas Simulated Annealing, AG e suas versões paralelas, bem como com a BT original. Através dos resultados obtidos os autores concluem que a BTP é melhor que as outras técnicas nesta aplicação.

Este artigo também aborda o problema de reconfiguração de sistemas de distribuição, inserindo uma otimização no tempo através do processamento paralelo, bem como estratégias de diversificação e refinamento. Porém, novamente o algoritmo não é aplicável ao problema da transmissão pelas mesmas limitações citadas anteriormente, apesar das novas estratégias propostas serem bastante úteis.

Toune et al [5] apresentam a aplicação da BTR para a recomposição de sistemas de distribuição de energia elétrica. O artigo trata-o como um problema de otimização combinatorial, dividindo a área desenergizada a cada fonte do sistema. São verificadas as condições elétricas do sistema através de fluxo de potência (tensão, corrente e potência) e as restrições são consideradas no método de busca. Para otimização do processo de armazenagem e recuperação

dos elementos da lista tabu é utilizada uma função de Hashing. A metodologia desenvolvida é comparada com as técnicas BT, AG e *Simulated Annealing* Paralela. Segundo os autores os resultados das simulações comprovam a eficiência da metodologia, destacando sua velocidade na resolução do problema.

Este artigo apresenta novamente a resolução do problema de restabelecimento de sistemas de distribuição (sistemas radiais), porém agora utilizando a BTR. Destaca-se a consideração das restrições elétricas do sistema, também consideradas na metodologia proposta nesta dissertação. Por tratar-se de uma abordagem combinatorial, a metodologia proposta não é aplicável ao problema da transmissão.

Wang e Liu [6] trataram o problema de recomposição através de um sistema que utiliza o raciocínio baseado em casos (RBC). Entretanto, os autores ressaltaram que, pelas características multi-camadas deste problema, não é fácil a implementação num sistema RBC. Assim, desenvolveram um sistema de suporte que utiliza o RBC hierárquico para a recomposição. Exploraram os mecanismos de recuperação, avaliação e aprendizado e mostraram a flexibilidade da decisão através do uso da decomposição do objetivo inicial. O sistema, segundo o apresentado no artigo, se mostrou elegível tanto para treinamento do operador quanto para a tomada de decisão “*on-line*” no processo de recomposição.

Na operação do sistema de transmissão, as instruções de operação contemplam a grande maioria dos possíveis problemas que podem ocorrer. Porém, podem ocorrer situações que não foram previstas e ainda associadas a falhas de supervisão, levando a interpretações erradas. Portanto, torna-se arriscado inferir raciocínios a partir destas informações sem a devida validação.

Para a modelagem do problema de recomposição, objeto de estudo dessa dissertação, criou-se uma base de dados de informações das instruções de operação e de conhecimento dos especialistas, semelhante a um sistema RBC.

Bretas e Phadke [7] apresentaram uma análise da recomposição de sistemas elétricos de transmissão e propõem uma metodologia baseada em RNA. A rede tem a estrutura de um perceptron multicamadas (MLP) e utiliza o algoritmo de treinamento de retropropagação (*backpropagation*). Os autores indicaram que os resultados das simulações realizadas foram satisfatórios. Ressaltaram como vantagens do sistema proposto: a velocidade de resposta e sua capacidade de generalizar, mesmo quando o número de possibilidades de falha é relativamente grande.

Diferentemente dos artigos anteriores, este aborda o problema da recomposição de sistemas de transmissão, utilizando RNA. A metodologia trabalha com a previsão de carga pós-ocorrência e determinação de seqüência de passos para recomposição, assim como verificação de restrições elétricas. Portanto, a abordagem adotada é de um problema seqüencial, como era de se esperar para um sistema de transmissão, assim como é proposto na metodologia apresentada nesta dissertação.

Fica evidenciada a grande aplicação das técnicas de Inteligência Artificial na resolução do problema de recomposição de sistemas elétricos. Destaca-se, porém, a utilização da BT e suas variações em sistemas de distribuição final, compreendido entre as subestações de distribuição e os consumidores, compostos pelos alimentadores. Porém, não se observa sua aplicação nos sistemas de transmissão como, por exemplo, na tensão de 138 kV.

Isso se deve ao fato da restauração de sistemas de distribuição final ser um problema combinatório, em que se deseja como resposta uma fotografia estática do sistema, com a configuração ótima segundo uma função custo. Já a recomposição de sistemas de sub-transmissão e transmissão é um problema de sequenciamento, em que é necessária uma nova otimização a cada ação realizada.

O exemplo a seguir permite uma boa compreensão da diferença entre os problemas de recomposição de sistemas de distribuição e transmissão.

Considere o sistema de distribuição da Figura 2.1 composto por dois alimentadores em condições normais de operação.

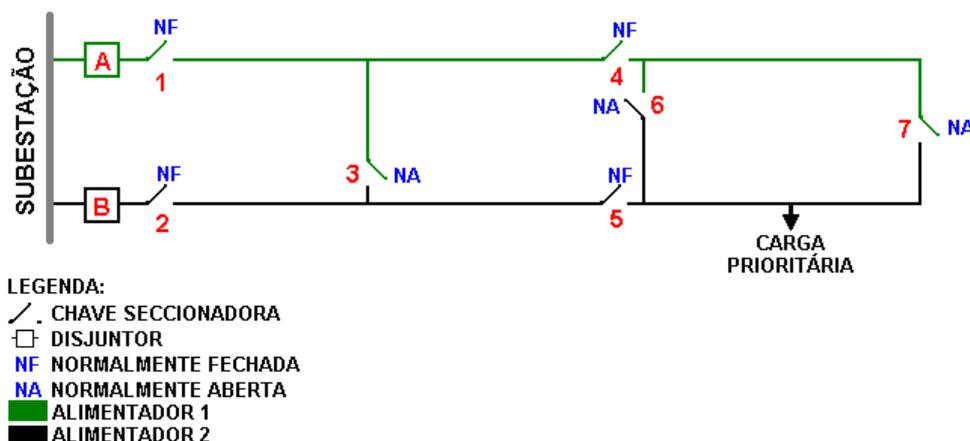


Figura 2.1 – Exemplo de sistema de distribuição

Observa-se que existem uma série de chaves seccionadoras que operam na condição normalmente aberta (chaves 3, 6 e 7), propiciando flexibilidade de manobra no caso de contingências no sistema. Cabe destacar que essas chaves não podem ser operadas sob carga, devendo os disjuntores A e B estar desligados para sua operação.

Considerando o sistema desenergizado e a ocorrência de um defeito permanente no trecho do alimentador 2 compreendido entre as chaves 2, 3 e 5, deseja-se obter a melhor solução para restabelecimento do sistema segundo uma função objetivo pré-determinada.

A resposta para este exemplo é dada através de uma análise combinatória da abertura ou fechamento de chaves uma a uma, gerando assim “fotos” do sistema considerando várias alternativas de configuração das chaves. A Figura 2.2 exemplifica uma dessas fotos do sistema representando a melhor solução analisada.

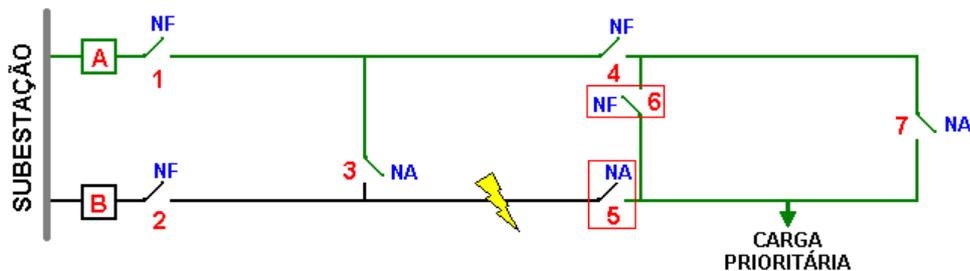


Figura 2.2 – Configuração do sistema de distribuição após desligamento

Verifica-se na Figura 2.2 que a chave 6 foi fechada e a chave 5 foi aberta, ambas com o sistema desenergizado. Na seqüência é fechado o disjuntor A, energizando as cargas do alimentador 1 e de parte do alimentador 2, incluindo cargas prioritárias.

Já para a recomposição do sistema de transmissão não é possível adotar esse mesmo raciocínio, tratando o problema de forma combinatória, conforme exemplificado a seguir.

Considerando o sistema de transmissão apresentado na Figura 2.3 composto por duas fontes distintas de suprimento em condições normais de operação:

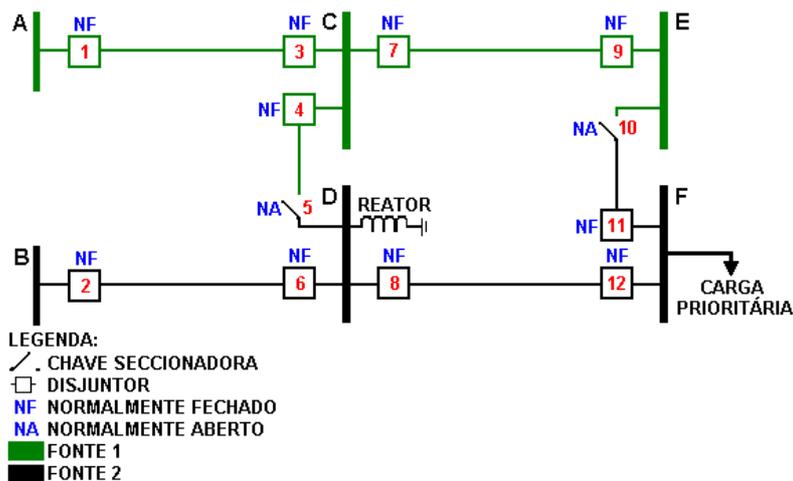


Figura 2.3 – Exemplo de sistema de transmissão

Observa-se que existem dois pontos como alternativa para suprimento em contingências, localizados nas chaves normalmente abertas 5 e 10.

Assim como no exemplo anterior, considerando o sistema totalmente desenergizado e a ocorrência de um defeito permanente entre os disjuntores 2 e 6, deseja-se recompor o sistema a fim de obter o maior valor da função objetivo.

Porém, para o problema da transmissão não basta determinar qual é a melhor configuração de chaves (foto do sistema) e energizá-lo pela fonte 1, fechando o disjuntor 1. Neste problema existem uma série de efeitos transitórios a cada passo executado, cujo controle é essencial para permitir a sua recomposição. O efeito mais relevante é a elevação de tensão durante a energização de linhas de transmissão em vazio.

Para exemplificar, considere como melhor solução da abordagem combinatória do problema a configuração de chaves e disjuntores apresentada na Figura 2.4:

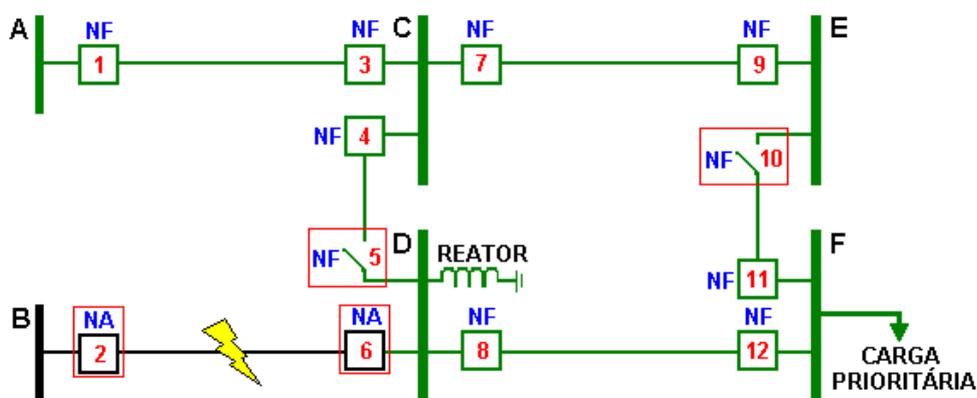


Figura 2.4 – Resposta do problema para abordagem combinatória

A Figura 2.4 apresenta a abertura dos disjuntores 2 e 6 para isolamento do defeito na linha e o fechamento das chaves 5 e 10 para recomposição da área afetada pelo desligamento.

No instante do fechamento do disjuntor 1 seriam energizadas todas as linhas de transmissão, com exceção da linha defeituosa. Essa ação acarretaria em uma elevação de tensão a níveis inaceitáveis em decorrência do efeito

capacitivo das linhas, causando a atuação dos dispositivos de proteção e novo desligamento no sistema.

Já com a abordagem do problema de forma seqüencial, cada passo é resolvido de forma individual e na seqüência eletricamente correta, levando em consideração os efeitos transitórios e suas contra medidas.

Por exemplo, supondo o sistema recomposto até a subestação C, conforme apresentado na Figura 2.5.

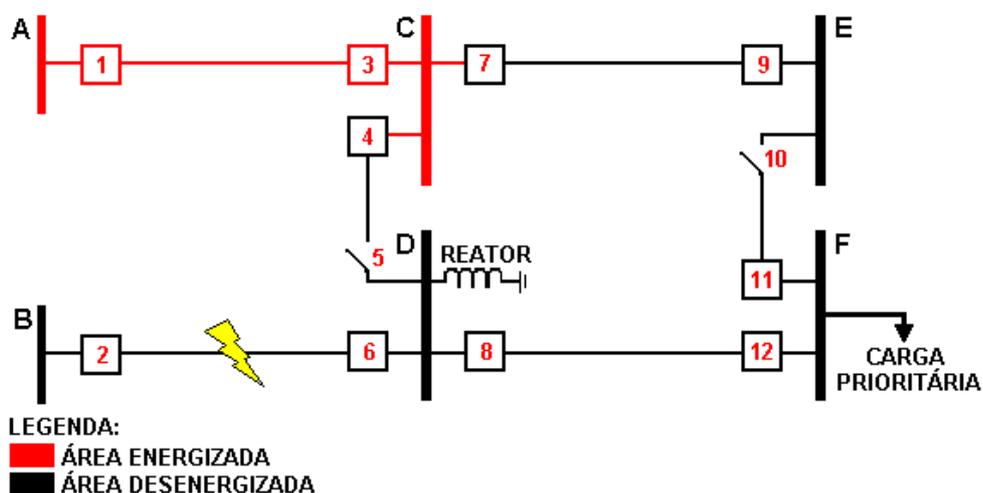


Figura 2.5 – Recomposição seqüencial do sistema até a subestação C

Na análise seqüencial do problema, como próximo passo pode-se fechar o disjuntor 4 ou 7. Porém, é conhecido através de instruções de operação que na subestação E não existem dispositivos de controle de tensão, neste caso um reator, ao contrário da subestação D. Logo, a energização da linha entre C e E não é possível pois ocasionaria sobretensão no sistema.

Portanto, a resposta ótima para o próximo passo desse problema seria a energização da linha entre C e D e adoção de medidas para controle de tensão em D. Somente assim seria possível continuar o processo, recompondo as cargas prioritárias da subestação F através da subestação D, conforme apresentado na Figura 2.6.

disponíveis para recomposição do sistema elétrico de 20 barras utilizado como modelo e, conseqüentemente, a complexidade do problema. São apresentados ainda os resultados obtidos com a BTSA e com as técnicas BT e BE, utilizadas para avaliação e comparação dos resultados.

No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões observadas no desenvolvimento da BTSA e na sua aplicação na recomposição do sistema elétrico de 20 barras. Concluí-se sobre seu desempenho quando comparado com as técnicas BT e BE. Por fim, são apresentadas sugestões de melhorias e futuras aplicações para a BTSA.

3 - Técnicas de Inteligência Artificial aplicadas ao problema de recomposição de sistemas elétricos

Neste capítulo serão apresentados os fundamentos, principais características e aplicações de algumas técnicas de Inteligência Artificial abordadas neste trabalho e utilizadas na otimização da recomposição de sistemas elétricos.

As técnicas estudadas serão: BT, BTR e AG.

As técnicas de BT e BTR foram utilizadas como referência para o desenvolvimento da metodologia proposta nesta dissertação, destacando-se ainda sua otimização através da inclusão de novos elementos baseados nos AG.

3.1 - Busca Tabu

A BT (TS) é uma técnica heurística para solução de problemas de otimização, projetada para auxiliar outras técnicas ou seus componentes para escapar de mínimos locais [9].

A BT apresenta como sua principal característica o uso de memória adaptativa para tornar a busca mais flexível. Diferencia-se, portanto, de outras técnicas que não utilizam recursos de memória, como a Simulated Annealing, ou a utilizam de forma rígida, como a *branch and bound*. A aplicação da memória é baseada nos fundamentos apresentados a seguir [9]:

- ✓ Uso de atributos flexíveis – estruturas de memória que permitem a variação dos parâmetros e histórico da busca;
- ✓ Mecanismos de controle associados – interação entre os mecanismos de exclusão e inclusão de variáveis;
- ✓ Funções de memória de tempos diferentes – permitem a intensificação e diversificação da busca.

Suas aplicações em diversas áreas, como por exemplo, distribuição de energia elétrica [3,4], otimização de RNA [10], otimização do carregamento de paletes [11], análise financeira, transporte, etc., têm apresentado bons resultados.

A BT é dividida em duas estratégias de uso da memória, curto prazo e longo prazo, apresentadas a seguir.

3.1.1 - Memória de curto prazo

A memória de curto prazo trabalha com as ações mais recentes dentro do processo de busca, ou seja, com suas últimas iterações. Ela é responsável pelo desenvolvimento básico da busca, sendo sua etapa mais agressiva. Sua metodologia é baseada nos componentes apresentados a seguir:

a) Lista Tabu

É o fundamento da técnica de BT, constituída de uma lista de elementos cuja utilização é proibida para determinadas iterações. Geralmente a lista tabu é do tipo *first in first out* – FIFO [12], ou seja, uma fila em que a cada novo movimento adicionado, o mais antigo é eliminado.

Seu objetivo é restringir os últimos movimentos realizados, levando o algoritmo inclusive a experimentar soluções piores com a finalidade de explorar áreas não visitadas do espaço de busca. Visa também evitar a ciclagem, execução repetitiva dos mesmos movimentos, como por exemplo, quando a busca situa-se em um mínimo local.

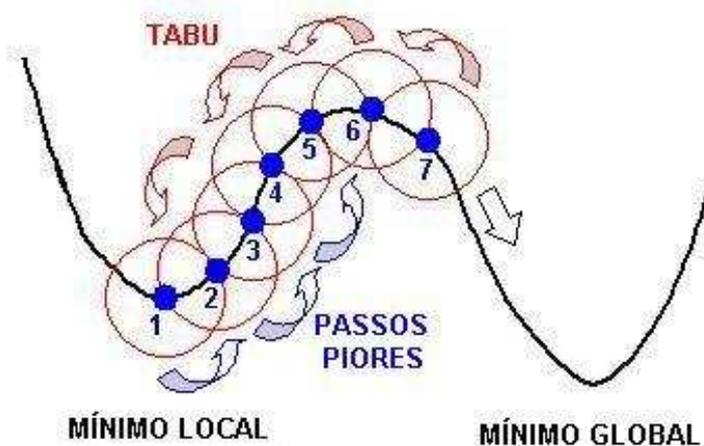


Figura 3.1 - Aplicação da lista tabu para escapar de mínimos locais

A Figura 3.1 demonstra a atuação da lista tabu forçando a busca a abandonar a solução 1, que trata-se de um mínimo local, e explorar soluções piores como a 2 e 3. A solução 1 é então inserida na lista tabu, impedindo que ao encontrar-se na solução 2 a busca volte a enxergar a solução 1 como melhor resposta e retorne a ela. Esse mecanismo impede a ciclagem e que o algoritmo fique preso em um mínimo local.

Esta estratégia de piora ocorre até o passo 6, quando o algoritmo passa a enxergar como melhor solução o passo 7, ou seja, passa a caminhar no sentido do mínimo global.

O tamanho da lista tabu, denominado comprimento tabu, normalmente é fixo, mantendo os elementos tabus na lista sempre pelo mesmo tempo ou número de iterações. Porém, existem aplicações nas quais o comprimento tabu é variável, ou seja, o tempo de permanência de um elemento tabu na lista pode variar [4].

Essa característica permite uma análise mais detalhada de regiões favoráveis com a redução do comprimento tabu, bem como análise menos detalhada em regiões desfavoráveis com o aumento do comprimento, ambas ao longo do processo de otimização.

b) Critério de Aspiração

Um ponto negativo da lista tabu é poder restringir a busca em determinadas regiões ótimas do espaço de busca, mas que apresentam elementos na lista tabu, restringindo sua exploração. Para evitar esta situação, o algoritmo da BT conta com uma função denominada critério de aspiração.

Este mecanismo permite a exclusão de um elemento da lista tabu quando a função aspiração supera determinado valor em relação à função custo, ou seja, atinge o nível de aspiração. De maneira prática, se um elemento da lista tabu apresenta melhor função custo que todos os elementos não tabus, então este elemento é retirado da lista e pode ser adotado como solução para esta iteração.

c) Critério de Parada

O critério de parada é uma função que define quando a busca deve ser encerrada. Ele é empregado a fim de evitar que o processo perdure além do tempo necessário à obtenção da solução ótima ou de uma resposta satisfatória, prejudicando assim seu tempo de resposta.

Existem diversos critérios de parada aplicáveis para cada tipo de problema, dentre eles destacam-se:

- ✓ Número de iterações – O processo é encerrado após um número máximo pré-estabelecido de iterações;
- ✓ Solução desejada – Quando uma meta estipulada inicialmente é atingida em determinada iteração;
- ✓ Ausência de melhoria – O processo é encerrado após um número pré-estabelecido de iterações sem melhoria na solução do problema;
- ✓ Conclusão do processo – A busca é encerrada após a conclusão de todas as etapas do processo. Por exemplo, na recomposição do sistema elétrico a conclusão do processo é quando todas as cargas foram restabelecidas.

Este último critério é o mais adequado ao problema de recomposição do sistema elétrico, pois a busca é concluída apenas quando todos os elementos do sistema foram restabelecidos.

d) Função Custo

A função custo é o elemento que vai identificar e quantificar quais são os objetivos do processo de otimização, de acordo com cada tipo de problema. Ela norteia a busca avaliando cada solução candidata, determinando aquela que traz mais benefícios ao processo de busca do ótimo global.

Para a recomposição do sistema elétrico, por exemplo, a função custo deve levar em consideração parâmetros como: priorização de cargas essenciais (Hospitais, aeroportos, sistemas de telecomunicação, penitenciárias, etc.), tempo de restabelecimento, parâmetros de qualidade da energia elétrica (tensão, frequência, etc.), segurança de pessoas e instalações, etc.

Cabe ao especialista especificar os pesos de cada parâmetro para a composição de uma função custo que retrate mais fielmente a otimização esperada pela BT.

O fluxograma básico da BT, contendo os elementos da memória de curto prazo, é apresentado na Figura 3.2.

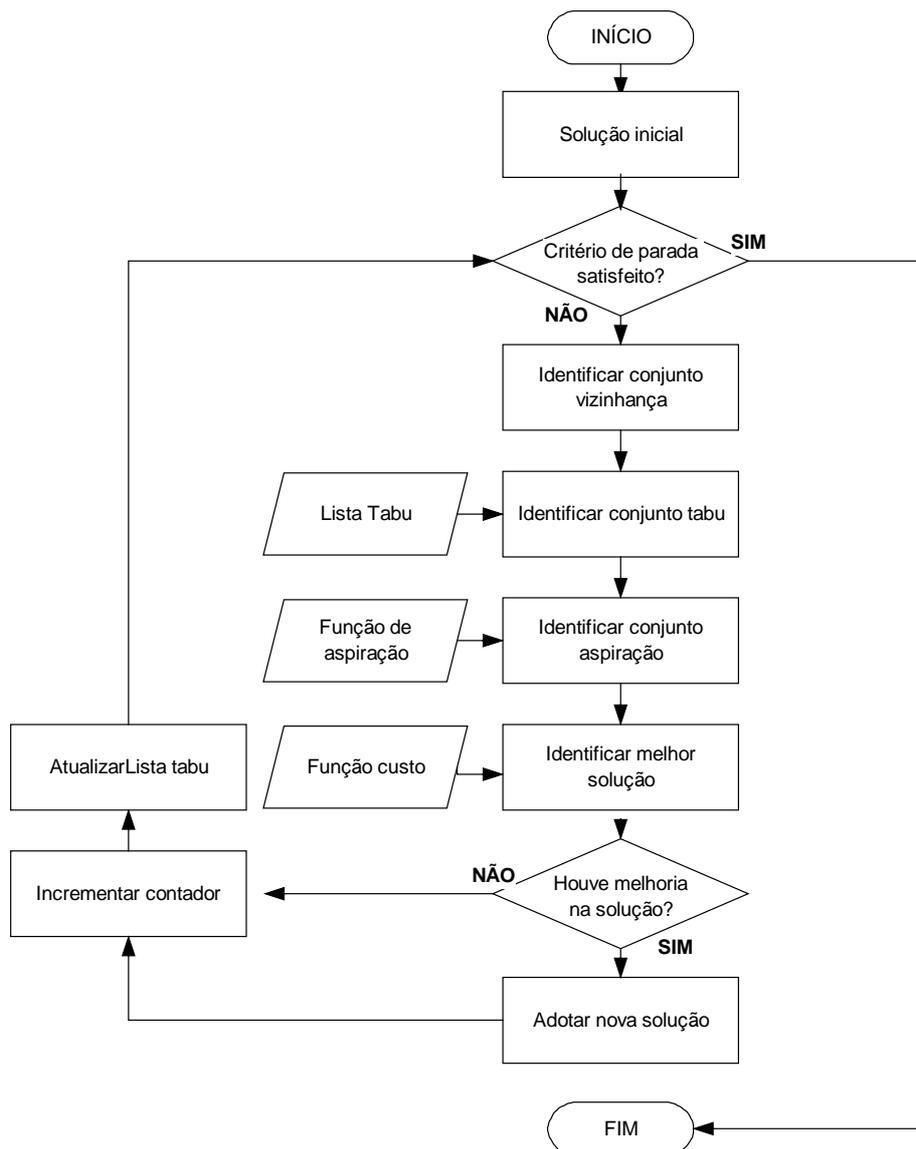


Figura 3.2 - Fluxograma da memória de curto prazo da BT

3.1.2 - Memória de longo prazo

A memória de longo prazo é empregada geralmente como uma estratégia de melhoria da técnica, sendo aplicada de acordo com o problema estudado. Seu princípio é dotar o algoritmo da BT de um histórico maior de informações analisadas, permitindo a identificação de regiões com promissoras, bem como fugir de regiões ruins [13].

A seguir são apresentadas as estratégias adotadas na memória de longo prazo:

a) Intensificação

A intensificação consiste da exploração mais detalhada de uma região que apresenta grande potencial para obtenção do ótimo global. Ela pode ser executada periodicamente entre um número determinado de iterações ou quando se deseja analisar melhor uma região do espaço de busca que apresentou bons resultados. O processo da memória de curto prazo é paralisado para a execução da intensificação e retomado posteriormente a partir de seu resultado.

Outra estratégia de intensificação é incorporar na solução elementos obtidos das melhores configurações analisadas, direcionando a busca para regiões de melhores resultados.

b) Diversificação

A diversificação atua no sentido contrário da intensificação, procurando levar a busca a regiões ainda não exploradas do espaço de busca. Ela é aplicada geralmente quando não são observadas melhorias na função custo durante um determinado número de iterações, caracterizando a saturação desta região.

As estratégias geralmente utilizadas são as inserções de elementos aleatórios, levando a solução a diferentes regiões, e a penalização de movimentos repetidos, obrigando a busca a caminhar por novas regiões.

3.2 - Busca Tabu Reativa

A BTR (RTS), uma variação do algoritmo original da BT, propõe a integração de um esquema de realimentação sensível histórica para determinação em tempo real de parâmetros, como por exemplo, o comprimento tabu e execução de passos aleatórios [14].

Seu objetivo é prover maior flexibilidade à técnica, permitindo sua aplicação na resolução de uma gama maior de problemas.

Existem diversos artigos descrevendo a aplicação da BTR em problemas de análise gráfica [15], acústica [16], distribuição de energia elétrica [5], otimização de rotas [17], etc.

Suas principais características são apresentadas a seguir.

3.2.1 - Auto-ajuste do comprimento tabu

O tempo na qual um elemento permanecerá na lista tabu é determinado através de realimentação durante o processo. Se for identificada a repetição de configurações já visitadas, o algoritmo aumenta o comprimento tabu, elevando o tempo de permanência dos elementos analisados na lista tabu. Essa estratégia provê diversificação à busca, obrigando a exploração de outras áreas do espaço de busca.

O movimento contrário também é realizado, ou seja, quando não há repetição de análise dos mesmos elementos o comprimento tabu é reduzido. Neste sentido é realizada uma intensificação naquela região do espaço de busca.

3.2.2 - Mecanismo de escape

A lista tabu e o auto-ajuste do comprimento tabu não são totalmente eficientes em evitar a formação de ciclos longos, limitando o espaço de busca a uma região. Para prover esta robustez ao algoritmo, uma diversificação mais radical, denominada mecanismo de escape, é iniciada quando várias configurações são visitadas muitas vezes, caracterizando ciclo longo.

O mecanismo consiste da execução de um determinado número de passos aleatórios, levando o algoritmo a explorar regiões diferentes daquela na qual se encontrava confinado.

3.2.3 - Gerenciamento dos dados históricos

Para permitir que os dois itens anteriores sejam implementados sem comprometer o tempo de resposta do processo, são inseridos algoritmos rápidos para executar o armazenamento e acesso aos eventos passados. Estes algoritmos são baseados na técnica denominada Hashing [18].

Em ciência da computação a tabela hash (de hashing, no inglês), também conhecida por tabela de espalhamento, é uma estrutura de dados especial, que associa chaves de pesquisa (hash) a valores. Seu objetivo é, a partir de uma chave simples, fazer uma busca rápida e obter o valor desejado [19].

3.3 - Algoritmos Genéticos

AG (*Genetic Algorithm*) são métodos de otimização e busca baseados em mecanismos de evolução de populações de seres vivos, fundamentados na seleção natural e na genética. Neles uma população de possíveis soluções para o problema em questão evolui de acordo com operadores probabilísticos [20, 21].

É empregada uma estratégia de busca paralela e estruturada, mas aleatória, que é direcionada à busca de pontos de alta aptidão, ou seja, pontos nos quais a função a ser maximizada tem valores relativamente altos [22].

Apesar da característica aleatória, sua caminhada é direcionada, pois exploram informações históricas para encontrar novos pontos de busca onde são esperados melhores desempenhos. Isto é feito através de processos iterativos, onde cada iteração é chamada de geração.

A cada nova geração os princípios de seleção e reprodução são aplicados a uma população de candidatos, que pode variar, dependendo da complexidade do problema e dos recursos computacionais disponíveis [23].

Há uma tendência de que na média os indivíduos apresentem soluções cada vez melhores à medida que o processo evolutivo continua, ou seja, a cada nova geração. O conjunto de soluções atuais é eficientemente explorado para encontrar novos pontos com melhor solução.

A estrutura da técnica é baseada nos cromossomos, as cadeias de DNA que modelam os organismos vivos. Um cromossomo é formado por genes, blocos de DNA, conforme apresentado na Figura 3.3:

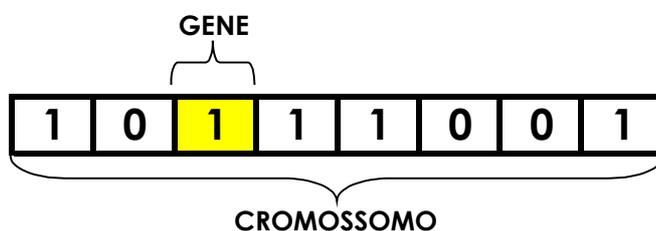


Figura 3.3 - Cromossomo

Cada gene codifica um traço de personalidade, como por exemplo, a cor dos olhos, e cada traço é chamado de alelo. Cada posição do gene em um cromossomo é chamada Locus. Ao conjunto de todos esses elementos é dado o nome de genoma.

Na biologia, este processo evolutivo é composto basicamente das seguintes etapas:

- ✓ Os indivíduos mais aptos irão sobreviver e se reproduzir;
- ✓ Durante a reprodução ocorre primeiramente o *crossover* ou recombinação, ou seja, os genes pais se combinam para formar um novo cromossomo;
- ✓ A mutação pode ocorrer provocando uma mudança em um elemento de DNA desse cromossomo;
- ✓ É medido o “fitness”, ou função objetivo, do indivíduo pelo sucesso deste em seu ambiente;
- ✓ Baseado nesse “fitness”, são determinados os indivíduos mais aptos para a reprodução, reiniciando o processo evolutivo.

As principais diferenças entre AG e os métodos tradicionais são:

- ✓ Executam a busca a partir de uma população (conjunto) de possíveis soluções, não a partir de um indivíduo isolado. Daí sua característica de paralelismo;
- ✓ Usam regras probabilísticas e não regras determinísticas [20].
- ✓ Não necessita da análise matemática da função ou de algum outro conhecimento auxiliar.
- ✓ Trabalham num espaço de soluções codificadas (binários, real, etc.), não diretamente no espaço de busca.

Os AG são aplicados na otimização da recomposição de sistemas elétricos [23], otimização da alocação de tarefas [24] e do escalonamento de tripulações [25], diagnóstico de faltas, sequenciamento de tarefas, telecomunicações, etc.

3.3.1 - Representação cromossômica

Para a aplicação dos AG é necessário primeiro representar cada possível solução no espaço de busca como uma seqüência S de símbolos, representando um cromossomo.

Existem diversas formas de codificação das possíveis soluções, sendo a mais usual a utilização do alfabeto binário $A=\{0,1\}$. Porém, tanto o método de representação cromossômica quanto o alfabeto genético dependem do problema.

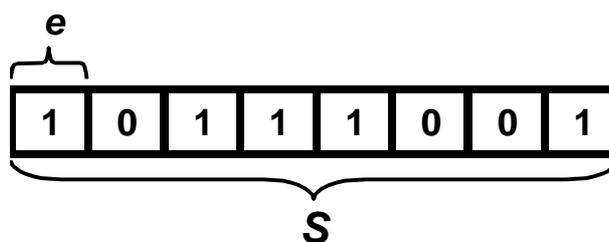


Figura 3.4 - Representação de uma solução possível

Na Figura 3.4 cada seqüência **S** corresponde a um cromossomo, representando uma solução possível, e cada elemento **e** é equivalente a um gene. Por exemplo, adotando-se cadeias de 5 bits temos a correspondência:

$$[x_{\min} , x_{\max}] \rightarrow [00000 , 11111]$$

Em que cada cromossomo decodificado torna-se:

$$(e)2^4 + (e)2^3 + (e)2^2 + (e)2^1 + (e)2^0 = x \quad (1)$$

3.3.2 - População

A população inicial de cromossomos pode ser produzida aleatoriamente ou através de algum processo heurístico. Por exemplo, jogando uma moeda podemos criar os indivíduos da população inicial, considerando-se cara equivalente a 1 e coroa a 0:

S1	1	0	1	1	1
S2	0	1	0	1	0
S3	0	0	1	0	1

Figura 3.5 - População inicial criada aleatoriamente

Cada iteração t durante o processo de busca é denominada de geração. Dessa forma calcula-se a função paralelamente em vários pontos do seu espaço de busca, conforme exemplificado na Figura 3.6:

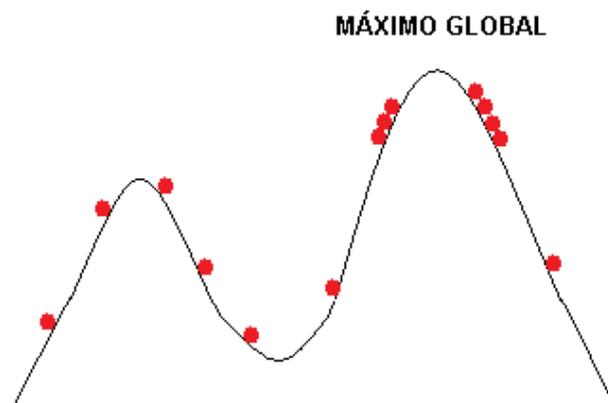


Figura 3.6 - Dispersão da população em uma geração t

A Figura 3.6 apresenta os vários indivíduos de uma geração distribuídos no espaço de busca de uma determinada função. Verificam-se indivíduos mais aptos concentrados próximos ao máximo global da função, bem como indivíduos dispersos pela função, com o objetivo de avaliar regiões não exploradas do espaço de busca.

Para permitir a avaliação de cada indivíduo da população a cada geração, ou seja, o quão bem adaptado ao ambiente ele está, os AG necessitam de uma função objetivo, comumente denominada “*fitness*”.

3.3.3 - Seleção

O processo de seleção é executado a fim de determinar os indivíduos mais aptos, nos quais serão aplicados os operadores genéticos. Para tanto, se gera uma população temporária de N indivíduos com probabilidade de seleção proporcional a adequabilidade em relação a sua população, medida através do seu *fitness*.

Nº	INDIVÍDUO	<i>FITNESS</i>	PROBABILIDADE DE SELEÇÃO
1	01101	169	14,4%
2	11000	576	49,2%
3	01001	64	5,5%
4	10011	361	30,9%
TOTAL		1170	100,0%

Tabela 3.1 – Exemplo de seleção

A tabela 3.1 exemplifica uma população composta de quatro indivíduos. Para cada um é calculado seu *fitness*, o qual irá definir sua probabilidade de seleção.

O processo de seleção mais comumente utilizado é o método da roleta, em que se imagina uma roleta fictícia semelhante à de um cassino, onde, com base nas probabilidades de seleção, sorteiam-se os indivíduos que irão sobreviver e produzir descendentes.

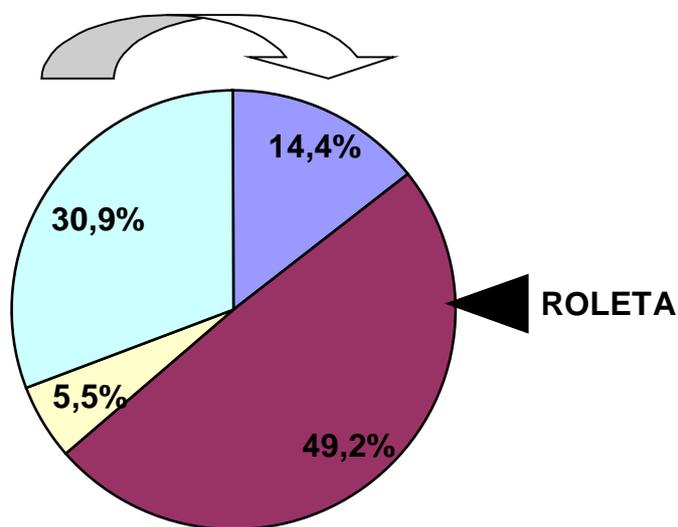


Figura 3.7 - Roleta para seleção dos indivíduos

A Figura 3.7 exemplifica a aplicação do método de seleção da roleta para a população apresentada na Tabela 3.1. A probabilidade de cada indivíduo é traduzida na forma de área no gráfico. Portanto, no sorteio os indivíduos com maior área, ou seja, mais aptos, terão maiores probabilidades de serem selecionados para a próxima geração.

Como resultado da aplicação do processo de seleção através da roleta nos indivíduos da Tabela 3.1 obtém-se o seguinte resultado:

Nº	INDIVÍDUO	Nº DE VEZES SELECIONADO
1	01101	1
2	11000	2
3	01001	0
4	10011	1
TOTAL		4

Tabela 3.2 – Resultado da seleção através do método da roleta

Na Tabela 3.2 verifica-se que o indivíduo 2, com maior *fitness*, foi selecionado duas vezes. Já o indivíduo 3, com menor *fitness*, não foi selecionado nenhuma vez. O resultado do processo comprova a teoria de seleção natural, pois o elemento mais apto tem mais chance de sobreviver e se reproduzir.

3.3.4 - Operadores Genéticos

O princípio básico dos operadores genéticos é transformar a população através de sucessivas gerações, estendendo a busca até chegar a um resultado satisfatório. Os operadores genéticos são necessários para que a população se diversifique e mantenha características de adaptação adquiridas pelas gerações anteriores [22].

Depois de eleitos os indivíduos mais aptos, através do processo de seleção apresentado anteriormente, são aplicados os operadores genéticos, os quais tem papel fundamental no desempenho dos AG, pois são responsáveis pelas operações probabilísticas de evolução.

Os principais operadores utilizados são a recombinação ou *crossover* e a mutação, descritos a seguir:

a) Recombinação

Este operador consiste da recombinação das características dos pais, previamente selecionados, dando origem aos descendentes, transferindo as características genéticas através das gerações [22].

A recombinação é o operador principal do processo evolutivo, sendo aplicado em uma porcentagem dos indivíduos de cada geração. A porcentagem de indivíduos destinados à recombinação é sempre maior que a porcentagem de indivíduos destinados à mutação, a fim de permitir que as características favoráveis das gerações passadas sejam transmitidas adiante.

Sua execução é realizada através da escolha de um ou mais pontos aleatórios no cromossomo a partir dos quais é realizada a troca de informações para os descendentes. Estes pontos são denominados pontos de cruzamento.

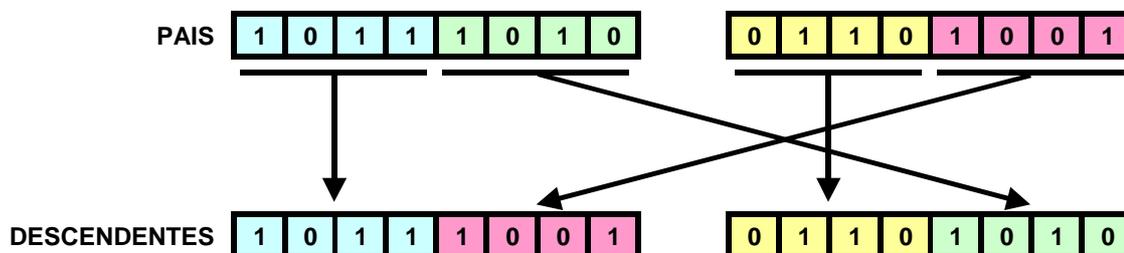


Figura 3.8 - Exemplo de recombinação com 01 ponto de cruzamento

Verifica-se no exemplo da Figura 3.8 que a partir do ponto de cruzamento as características de um indivíduo são re combinadas com as de outro, dando origem a um novo indivíduo que carrega informações dos dois ascendentes. Isso faz com que as características favoráveis dos pais sejam mantidas e ao mesmo tempo melhorias sejam exploradas dentro do espaço de busca.

b) Mutação

Este operador é responsável pela manutenção da diversidade genética da população [22], proporcionando diversificação ao processo de busca através da exploração de regiões aleatórias do espaço de busca. Esta característica objetiva evitar a convergência da busca a mínimos locais.

Ela é aplicada em uma pequena porcentagem dos descendentes criados pela recombinação, sendo realizada através da alteração aleatória de um ou mais pontos do cromossomo, dando origem a descendentes com mutação.

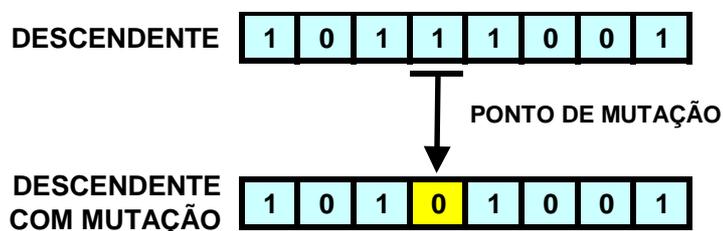


Figura 3.9 - Exemplo de mutação de 01 gene

Verifica-se no exemplo de Figura 3.9 a aplicação da mutação em um ponto de um descendente. Esse descendente afetado pela mutação permitirá a exploração de regiões do espaço de busca diferentes daquelas nas quais estão concentrados os indivíduos mais aptos, provendo diversificação ao algoritmo.

A Figura 3.10 na seqüência representa o fluxograma básico dos AG.

Apresentaram-se, portanto, as características, estratégias de utilização e as principais áreas de aplicação de algumas técnicas de Inteligência Artificial que são aplicadas ao problema de recomposição de sistemas elétricos.

Estas técnicas serviram de base para o desenvolvimento da metodologia apresentada no próximo capítulo, uma variação da BT denominada BTSA.

A BT original foi utilizada como princípio de partida para a concepção desta pesquisa, mesmo com suas limitações na resolução do problema objeto de estudo, recomposição do sistema de transmissão.

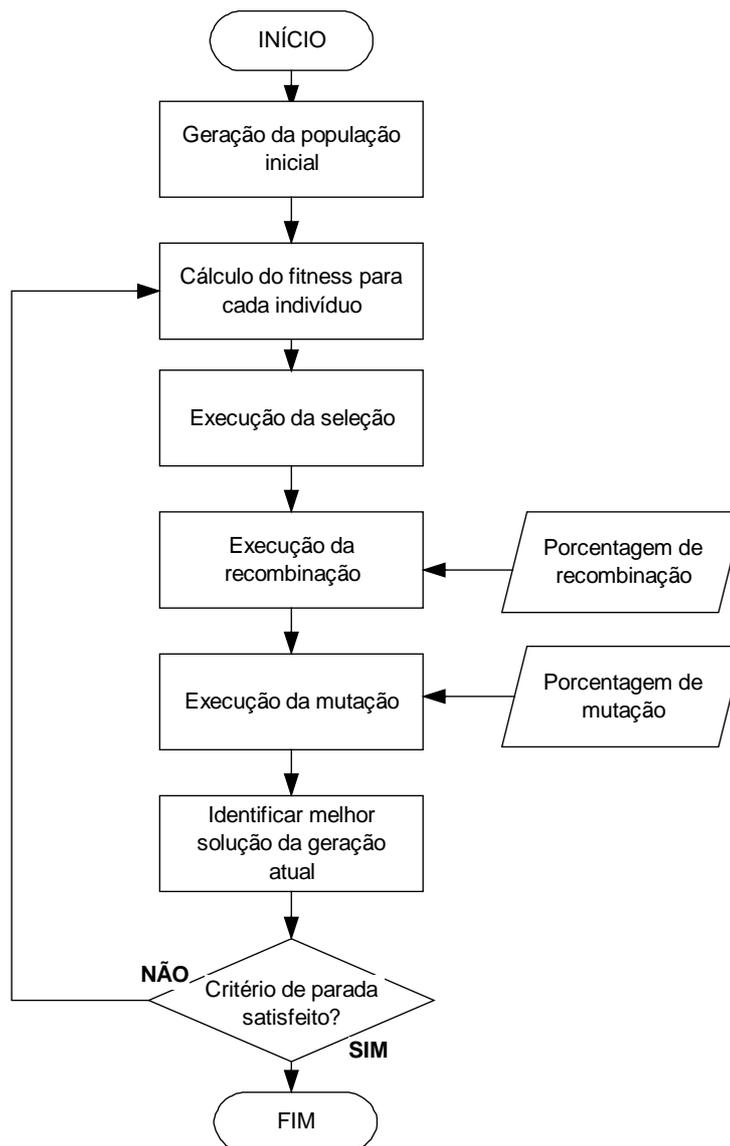


Figura 3.10 - Fluxograma básico dos AG

A BTR contribuiu na dissertação através do seu conceito de realimentação do sistema para definição de parâmetros ao longo do processo.

Já os AG colaboraram nesta pesquisa com seus elementos seleção natural e mutação, que inspiraram a criação de elementos semelhantes na BTSA, denominados elitismo e aleatoriedade. Esses elementos propiciaram diversificação e intensificação a metodologia proposta.

No capítulo 4 é apresentada a concepção e modelagem da BTSA a partir dos conceitos das técnicas de BT, BTR e AG descritas anteriormente, bem como outras características desenvolvidas ao longo da pesquisa.

4 - Busca Tabu Seletiva Adaptativa

4.1 - Introdução

A recomposição do sistema elétrico após blecaute pode ser classificada como um problema de sequenciamento progressivo e irreversível.

A característica de progressividade é devida ao fato que os equipamentos devem ser restabelecidos numa seqüência eletricamente factível, ou seja, não faz sentido fechar um disjuntor de uma linha em determinada subestação se o barramento e a linha estiverem desenergizados. Outros equipamentos devem ser restabelecidos primeiro, energizando progressivamente o sistema. Logo, o algoritmo de busca deve excluir os caminhos eletricamente não factíveis, evitando sua avaliação desnecessária.

Durante a recomposição, após energizado, um equipamento não é mais desligado, exceto nos casos de novos desligamentos automáticos ou contingências, daí a característica irreversível do processo. Portanto, a busca não poderá avaliar hipóteses que levam em consideração o desligamento de um equipamento já energizado.

Outra característica importante é que este problema é extremamente regrado, ou seja, toda ação a ser executada está sujeita a uma regra determinada por procedimentos operativos e estudos elétricos. Exemplo: A energização de uma linha de transmissão está sujeita aos procedimentos padronizados que garantam a segurança do sistema e das pessoas, e a condições elétricas de pré-energização, como a tensão no barramento de origem e o chaveamento de reatores no terminal seguidor.

A execução de uma ação durante a recomposição com melhor resultado imediato não garante melhores resultados no futuro. Isto se deve ao fato de existir

prioridades de recomposição no processo, conforme ilustrado no exemplo da Figura 4.1.

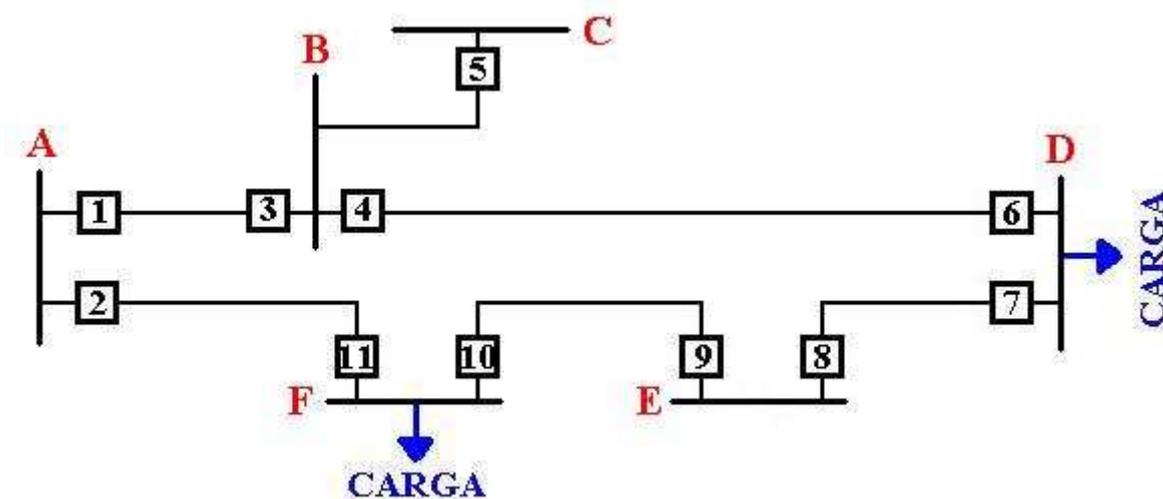


Figura 4.1 - Exemplo de recomposição do sistema

Pela análise do diagrama, considerando-se a barra A como única fonte do sistema, nota-se claramente que a seqüência de fechamento dos disjuntores 2 - 11 é intuitivamente melhor que a seqüência 1 - 3, pois já permite o restabelecimento de carga na subestação F.

Porém, se estabelecermos que na subestação D encontram-se as cargas prioritárias da região, como hospitais, a seqüência 1 - 3 - 4 - 6 obterá o melhor ganho segundo função custo específica, apesar de exigir mais passos e demandar maior tempo.

É evidente a necessidade de se levar em consideração também os parâmetros número de passos e tempo. Portanto, o algoritmo de busca deve analisar não apenas o ganho imediato, mas também as perspectivas, ponderando através da função custo a relação prioridade versus tempo.

Diante destas características do problema, a técnica de BT original apresentava limitações para sua aplicação, conforme discutido a seguir.

A lista tabu armazena os últimos movimentos realizados, porém, na recomposição não há sentido em repetir uma ação já executada devido sua característica de progressividade. Logo, essa função perde sua aplicação.

Na aplicação do algoritmo de BT a este tipo de problema, quando um caminho é escolhido, ele é avaliado apenas no seu ganho imediato, não se levando em consideração as próximas ações. Por exemplo, ainda considerando o sistema de Figura 4.1, a BT poderia considerar como melhor solução a seqüência de fechamento 1 – 3, não enxergando os ganhos da energização da subestação D, conforme visto anteriormente.

Isso pode conduzir a um mínimo local, pois o ponto ótimo poderia ser obtido nos próximos passos através de outra seqüência de recomposição. Ou seja, não há uma análise da condição futura do problema que promova uma realimentação corrigindo eventuais distorções.

A BTR já apresenta uma característica de realimentação, analisando os eventos registrados nas iterações passadas com o objetivo de diversificar ou intensificar a busca. Porém, esta realimentação é aplicada à determinação do comprimento tabu, e não na determinação da resposta da iteração.

Os mecanismos de intensificação e diversificação originais do algoritmo de BT apresentam um comportamento independente da característica do problema, sendo regidos em geral pela resposta do algoritmo ao problema (função custo). Por exemplo, a intensificação é aplicada quando o algoritmo identifica, através da resposta, uma região promissora. Já a diversificação é aplicada quando não se observa melhoria na resposta durante determinado período.

A BTR dispõe de um mecanismo de diversificação baseado em valores aleatórios, porém, também dependente da resposta do algoritmo ao problema.

Para suprimir estas limitações do algoritmo original da BT e da BTR na resolução do problema de recomposição de sistemas elétricos de transmissão,

foram implementadas melhorias em seu algoritmo, resultando na técnica denominada BTSA.

4.2 - Metodologia proposta

O desenvolvimento da metodologia proposta teve início com a simples tentativa de aplicação da BT, em sua versão original, na otimização da recomposição de sistemas elétricos de sub-transmissão. A motivação para sua utilização surgiu das diversas referências bibliográficas da utilização da BT na otimização da reconfiguração de sistemas de distribuição após desligamentos [3,4,5].

Porém, concluiu-se que suas características a tornavam inválida para aplicação na recomposição de sistemas de transmissão, que é notadamente um problema de sequenciamento e extremamente regrado, ao contrário da recomposição de sistemas de distribuição, que se trata de um problema combinatório.

A partir do estudo da BTR, mais precisamente de sua característica de realimentação, começou-se a trabalhar na adaptação desta técnica para problemas de sequenciamento. Foram remodelados seus elementos básicos como Lista Tabu e Critério de Aspiração.

Com seus fundamentos definidos, foram inseridos à nova metodologia elementos que a tornasse mais eficiente, diferenciando-a de uma BE. Para tanto, foram utilizados conceitos básicos dos mecanismos de seleção natural e mutação, encontrados na técnica de AG. Foi desenvolvido ainda um gerenciador desses parâmetros, permitindo sua auto-calibração a cada iteração durante o processo de busca.

Por fim desenvolveu-se um mecanismo de criação de bordas de busca, limitando o espaço de busca a cada iteração, focado novamente no aumento da eficiência.

Chegou-se, portanto, na técnica denominada BTSA, destinada à otimização de problemas de sequenciamento baseado em regras, como a recomposição de sistemas elétricos de transmissão após blecaute.

Suas principais características e variações com relação à BT e BTR, bem como os elementos adaptados dos AG são apresentados a seguir.

4.2.1 - Modelagem do Sistema Elétrico

O sistema elétrico foi modelado de maneira simplificada, levando-se em consideração apenas à estrutura física do sistema, não sendo modelados os parâmetros elétricos. Considerou-se o processo de recomposição como restabelecimento de linhas através do fechamento de disjuntores e disponibilização de tensão nas barras das subestações. Para tanto foram modelados os seguintes elementos:

- ✓ Subestações – Representadas pelo barramento de alta tensão;
- ✓ Linhas – Elementos que efetuam a interligação entre subestações;
- ✓ Disjuntores – Dispositivos manobráveis responsáveis pela conexão de linhas às subestações;
- ✓ Chaves seccionadoras – Dispositivos semelhantes aos disjuntores, porém, não podem ser manobrados sob carga. Foram considerados normalmente fechados neste sistema;
- ✓ Existência ou ausência de tensão nas subestações e linhas;
- ✓ Prioridade de subestações.

4.2.2 - Regra Tabu

Para o problema em estudo, conforme exposto anteriormente, a lista tabu perde sua função, pois na recomposição os movimentos não são repetidos, sendo

desnecessário restringi-los. Por outro lado, foi destacada a importância das regras neste processo.

Logo, a lista tabu é transformada na regra tabu, um banco de regras lógicas contendo as informações das instruções de operação e experiência dos operadores, necessárias à recomposição do sistema.

Destaca-se que a complexidade da regra tabu é intrínseca do problema a qual a BTSA é aplicada, transformando-se, neste caso de recomposição de sistemas elétricos, no elemento mais trabalhoso a ser modelado para aplicação da técnica.

As regras codificadas neste problema abrangem as seguintes características:

- ✓ Verificação de tensão – Verifica a ausência ou existência de tensão em uma linha ou barramento como pré-condição para execução de uma ação.

Exemplo:

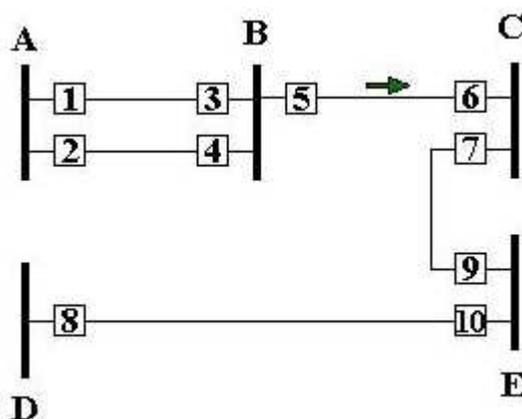


Figura 4.2 - Sistema modelo para aplicação de regras

Se tensão na Barra B = 0 e tensão na LT B - C = 0

Disjuntor 5 da LT B - C = aberto

Fim

- ✓ Verificação do sentido de energização de linhas – Verifica se determinada linha está sendo energizada em sentido normal ou inverso, bem como se este sentido inverso é permitido. Exemplo: O Disjuntor 6 não pode ser fechado se a *LT B – C* estiver sem tensão;
- ✓ Verificação do fechamento de sincronismo – Verifica as pré-condições e permissividade para o fechamento de anel ou paralelo entre diferentes fontes. Exemplo: Se houver tensão de fontes diferentes na *SE C* e na *LT C - E*, então o fechamento do Disjuntor 7 não é permitido por ele não possuir relé de sincronismo.

Existem ainda regras específicas para situações mais complexas na operação do sistema elétrico, descritas a seguir:

- ✓ Linhas energizadas a montante – Verifica a necessidade de energização de mais linhas ou circuitos paralelos a montante de uma subestação para permitir o prosseguimento da recomposição. Exemplo: Para energização de *LT B-C* é necessário que estejam energizados os dois circuitos da *LT A-B*.
- ✓ Linhas em vazio – Restringem o fechamento de circuitos paralelos de uma mesma linha em vazio. Exemplo: Se o circuito 01 da *LT A-B* estiver energizado em vazio, ou seja, se o Disjuntor 1 estiver fechado e o Disjuntor 3 estiver aberto, então não é permitido o fechamento do Disjuntor 2, que energizaria o segundo circuito em vazio.

A regra tabu resulta em um elemento fundamental na BTSA para a identificação e filtragem dos caminhos eletricamente factíveis. Este processo evita a análise pelo algoritmo dos caminhos eletricamente inexistentes, resultando em melhoria na performance da busca.

Ela também é utilizada para fornecer subsídios para o cálculo da função objetivo, atribuindo, a cada solução analisada, uma pontuação por cumprimento

ou penalização por descumprimento de regras, conforme é apresentado no item 4.2.8 – Função Objetivo.

A regra tabu é passível de edição, de forma a contemplar alterações na topologia do sistema e atualização de procedimentos operativos.

4.2.3 - Critério de Aspiração

De maneira geral as regras contidas na regra tabu não são flexíveis, ou seja, não podem ser ignoradas ou desobedecidas. Porém, para algumas situações específicas do sistema elétrico foram criados critérios de aspiração, a fim de permitir maior coerência com a realidade.

Tais critérios permitem à técnica avaliar a necessidade de aplicação de algumas regras as quais exigem pré-condições, aproximando-se da análise crítica de um operador.

A seguir são apresentados os critérios de aspiração adotados:

- ✓ Inversão de sentido – Inverte o sentido normal de energização de uma linha desde que o sentido inverso seja permitido.

Exemplo: Considerando o sistema apresentado na Figura 4.3:

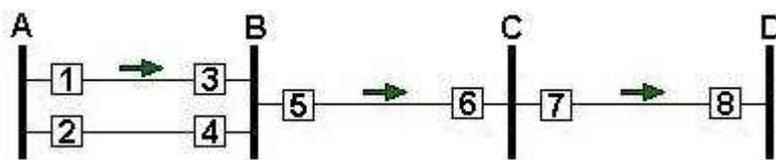


Figura 4.3 - Sistema modelo para aplicação do critério de aspiração

Supondo a possibilidade de execução de duas ações durante sua recomposição: Energizar a SE B através da LT A-B (Sentido normal) ou energizar a SE C através da LT D-C (Sentido inverso - permitido), sendo a SE C prioritária em relação a SE B. Sob o ponto de vista do operador, a

energização da LT D-C tem maior importância nesse instante. Para tanto, o algoritmo permite a aspiração da regra, invertendo-se o sentido preferencial de energização da LT D-C. Cabe salientar que se houvessem duas linhas aptas a energizar a SE C, e uma delas fosse em sentido normal, o critério de aspiração não se aplicaria;

- ✓ Alteração do ganho – Mudança do ganho atribuído a uma determinada ação de acordo com a topologia do sistema. Exemplo: Considerando o sistema da Figura 4.3, a energização do segundo circuito da LT A-B em uma primeira etapa da recomposição pode ser desnecessária. Porém, à medida que é recomposta carga a jusante da SE B a energização do segundo circuito torna-se necessária para reduzir o carregamento no primeiro. Desta forma, a pontuação associada à regra de análise destas ações é alterada em função da topologia do sistema.

4.2.4 - Verificação de Borda

Uma rotina importante para a otimização do processo de busca é a determinação de uma “borda” para o espaço de busca. Este procedimento funciona como um mecanismo de intensificação, sendo realizado da seguinte forma:

- ✓ Identifica-se a subestação prioritária a ser energizada;
- ✓ Identificam-se as subestações energizadas;
- ✓ Verifica-se qual subestação energizada está mais próxima da prioritária, ou seja, a que exige menos manobras de disjuntores para a interligação entre elas. Esta subestação é denominada “borda”;
- ✓ Eliminam-se as soluções que se iniciam em subestações mais distante que a subestação de borda.

A eliminação de subestações fora da borda pode ser parametrizada para abranger 1, 2, ..., n passos além da borda, conforme exemplificado a seguir.

Exemplo:

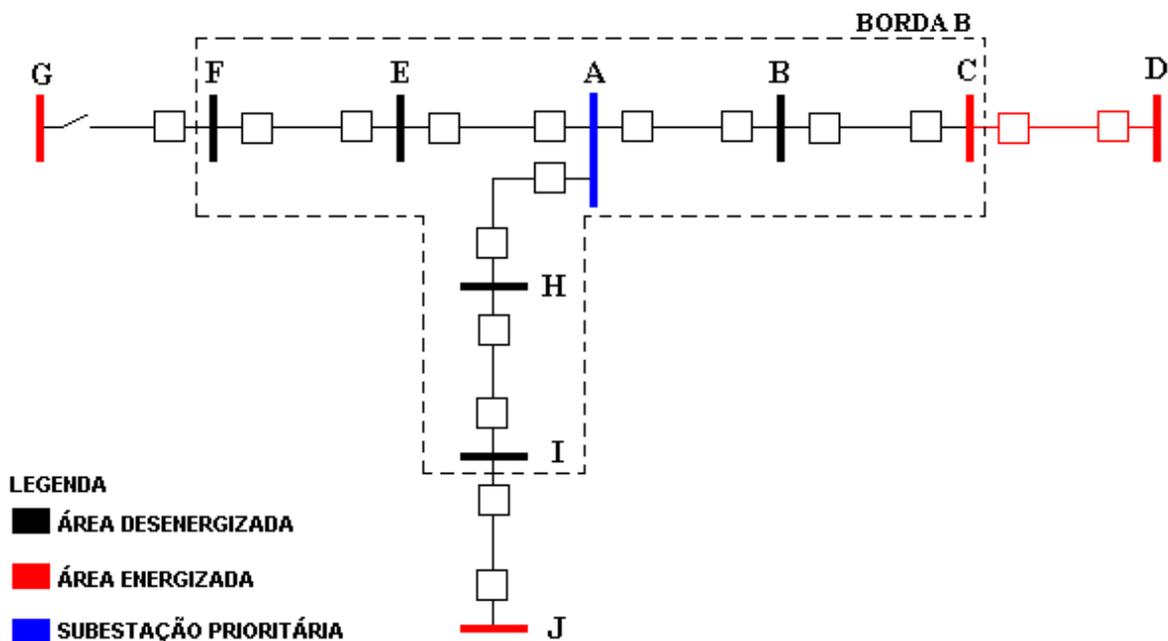


Figura 4.4 - Criação da borda de eliminação B

A Figura 4.4 representa a criação de uma borda B em torno da subestação prioritária A, gerada a partir da subestação energizada mais próxima de A, que neste exemplo é a subestação C. As soluções que se originam das subestações G e J são descartadas por estarem fora dessa borda.

Já se for considerado um passo além da borda, criando-se a borda B + 1 conforme apresentado na Figura 4.5, a subestação G passará a ser considerada na busca, tendo em vista que a chave seccionadora é um elemento normalmente fechado, não contando como uma manobra.

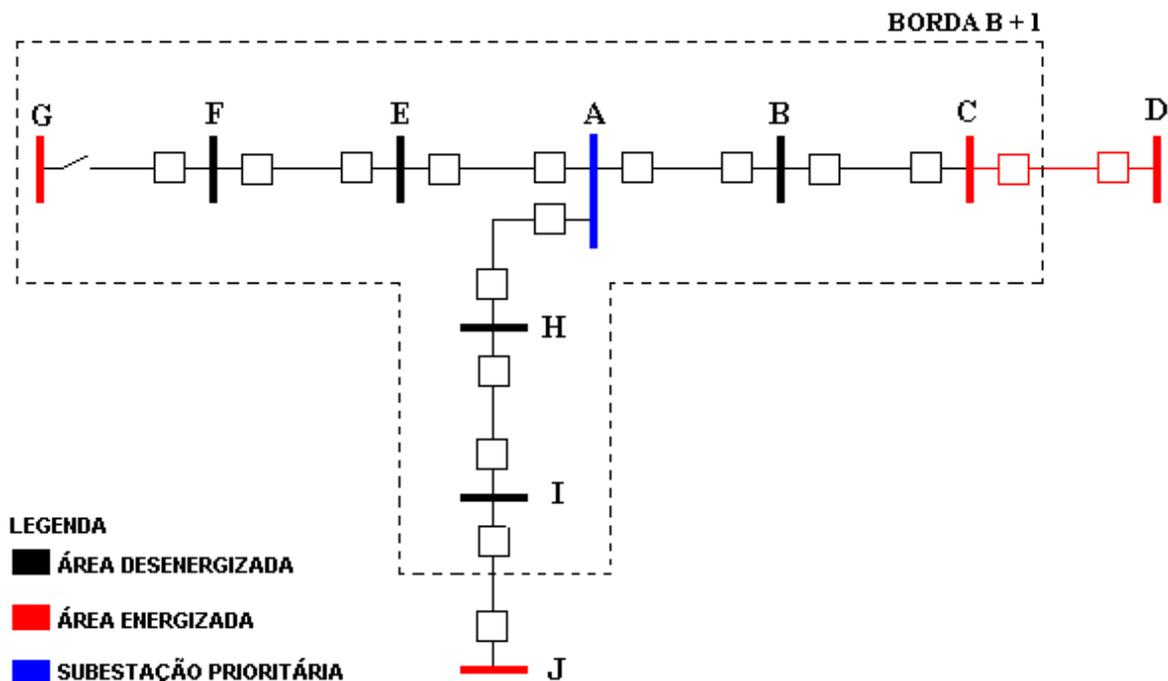


Figura 4.5 - Criação da borda de eliminação B + 1

Para as simulações realizadas nesta pesquisa, foram parametrizadas as eliminações para as subestações localizadas um passo além da borda (B + 1).

4.2.5 - Elitismo e Aleatoriedade

Para permitir a análise não apenas do ganho obtido na iteração atual, mas também analisar os próximos passos do processo, o algoritmo implementado efetua, para cada iteração, a eleição de uma determinada quantidade das melhores respostas para serem avaliadas em seus próximos passos. O número de soluções eleitas é determinado pela variável **A**.

Este mecanismo provê a cada iteração uma intensificação da busca nas regiões mais promissoras, avaliando ainda se esta característica favorável se mantém no decorrer do processo.

Além da eleição entre as melhores soluções, são escolhidas, aleatoriamente, determinada quantidade de soluções. O número de soluções

escolhidas aleatoriamente é determinado pela variável **B**. As soluções escolhidas por **B** são sempre diferentes das eleitas por **A**.

A aleatoriedade proporcionada por **B**, no sentido contrário do elitismo, diversificará a busca a cada iteração, explorando diferentes regiões do espaço de busca.

Destaca-se que o elitismo e a aleatoriedade farão com que a busca cresça exponencialmente, portanto, para determinação de seus valores deve-se levar em consideração o tamanho do problema, com o nível de precisão e tempo de resposta desejado. A determinação desses parâmetros é efetuada através da auto-calibração, descrita no item 4.2.7.

4.2.6 - Passos Futuros e Realimentação

O mecanismo de realimentação permite que as soluções escolhidas através do elitismo e da aleatoriedade sejam analisadas pelas próximas $N + K$ iterações, em que N é a iteração atual e K é o número de passos futuros a serem analisados. O resultado desta análise realimenta o processo para definição da verdadeira melhor solução para a iteração N , baseada na análise futura.

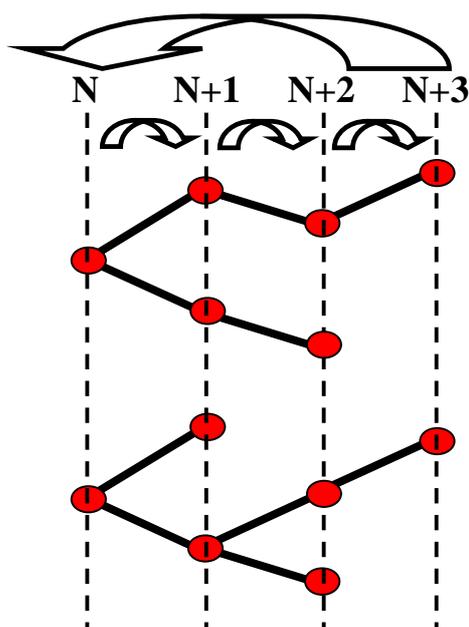


Figura 4.6 - Análise de passos futuros e realimentação

A Figura 4.6 representa a análise de passos futuros para uma árvore de soluções. O algoritmo parte da iteração atual N , e analisa as soluções possíveis ao longo das próximas três iterações, $N + 3$. Ao final desta análise ele retorna a iteração N e determina sua melhor solução baseada no conhecimento futuro adquirido.

A quantidade de passos futuros a serem analisados também ocasionará um crescimento exponencial da busca. Seu valor, também determinado no processo de auto-calibração, deve levar em consideração as características do sistema elétrico naquele instante.

4.2.7 - Auto-calibração

A recomposição do sistema elétrico possui uma dinâmica muito grande a cada ação executada, portanto, o processo de busca deve seguir esta dinâmica e se auto-ajustar a cada novo cenário desenhado.

Na BTSA este procedimento, denominado auto-calibração, permite a análise e ajuste dos parâmetros Elitismo, Aleatoriedade e Passos Futuros a cada iteração. Os subsídios para essa análise são os seguintes parâmetros do sistema elétrico:

- ✓ Subestação prioritária;
- ✓ Subestação de borda;
- ✓ Matriz de distâncias – Matriz contendo o número de manobras para interligação entre todas as subestações, duas a duas. À diagonal é atribuído um valor superior à maior distância possível entre duas subestações como um mecanismo para inviabilizar a verificação de distância entre a mesma subestação. Entre algumas subestações é indicada a distância zero, que significa a existência apenas de chave seccionadora entre elas. A matriz de distâncias é apresentada no Anexo 4;

- ✓ Condições sistêmicas – Número de fontes disponíveis para restabelecimento, fechamentos de anel entre fontes e situação das subestações estratégicas do sistema.

Exemplificando-se, a auto-calibração funciona da seguinte forma:

Após identificadas pelo algoritmo da BTSA qual é a subestação prioritária e a subestação de borda, são efetuadas verificações, conforme exemplificado a seguir:

- ✓ As fontes para restabelecimento do sistema em sentido normal estão disponíveis?
 - SIM – Elitismo elevado e aleatoriedade reduzida – Os caminhos preferenciais estão disponíveis, logo não há necessidade de exploração de caminhos alternativos;
 - NÃO – Elitismo reduzido e Aleatoriedade elevada – Há necessidade de explorar mais os caminhos alternativos.
- ✓ Elevado número de manobras entre a subestação borda e a prioritária?
 - SIM – Passos futuros elevado – Possibilitar que na análise futura das soluções se consiga chegar até a subestação prioritária ou até próximo desta;
 - NÃO – Passos futuros reduzido – Reduz o horizonte para evitar processamento desnecessário.

Com base nessas verificações, o algoritmo define as porcentagens de Elitismo e Aleatoriedade que serão utilizados na iteração atual, bem como o número de Passos Futuros a serem analisados.

4.2.8 - Função Objetivo

A Função Objetivo é modelada de forma a tentar se aproximar do raciocínio do operador, principalmente sob o enfoque de análise da situação presente e ponderação das conseqüências da ação futura. Ela também deve ser capaz de avaliar não apenas os aspectos locais de uma ação, mas sim os reflexos no restante do sistema.

Neste sentido, foram estabelecidos parâmetros considerados fundamentais na recomposição do sistema elétrico:

- ✓ Restabelecimento de subestações (A) – Restabelecimento da maior quantidade de carga possível;
- ✓ Obediência as Instruções de Operação (B) – Seguir mais fielmente as diretrizes contidas nas instruções;
- ✓ Ganhos sistêmicos (C) – Ações que levam a estabilidade e fortalecimento do sistema durante a recomposição;
- ✓ Tempo (D) – Penalização pelo tempo gasto na recomposição.

A cada parâmetro foi atribuído um peso w variando de 1 a 10, responsável pelo estabelecimento da diretriz desejada para a recomposição, como por exemplo, priorização da rapidez (peso elevado para o parâmetro tempo) ou da segurança operativa (peso elevado para o parâmetro instruções de operação).

Dentro de cada um dos quatro parâmetros descritos acima é analisada uma série de condicionantes do sistema elétrico para cada solução possível, avaliadas durante a verificação das regras. Essas condicionantes, descritas a seguir, geram pontos que são totalizados aos seus respectivos parâmetros (A, B, C ou D).

- ✓ Energização em sentido normal;
- ✓ Número de manobras, que implica em tempo de recomposição;
- ✓ Fechamento de linhas em vazio;

- ✓ Inversão de sentido de energização;
- ✓ Possibilidade de energização de subestações a jusante;
- ✓ Possibilidade de fechamento de anel na subestação a jusante;
- ✓ Fechamento de circuitos paralelos, dependendo da configuração do sistema;
- ✓ Fechamento de anel entre fontes.

Portanto, a Função Objetivo é calculada pelo somatório dos parâmetros ponderados:

$$\text{Função Objetivo} = A \cdot w_1 + B \cdot w_2 + C \cdot w_3 + (1/D) \cdot w_4 \quad (2)$$

em que w_1 , w_2 , w_3 , e w_4 são os pesos atribuídos a cada parâmetro.

Pela modelagem da Regra Tabu e a forma como a Função Objetivo foi implementada, ela possui a característica de avaliar situações potenciais para a próxima iteração da busca. Exemplo: Se ao fechar um disjuntor cria-se uma condição de fechamento de anel no próximo passo, esta pré-disposição será levada em consideração na apuração da Função Objetivo para o passo atual.

4.2.9 - Apuração dos resultados

Para possibilitar a apuração e análise dos resultados obtidos na aplicação da BTSA, bem como comparação com outras metodologias, foram estabelecidos quatro parâmetros de avaliação:

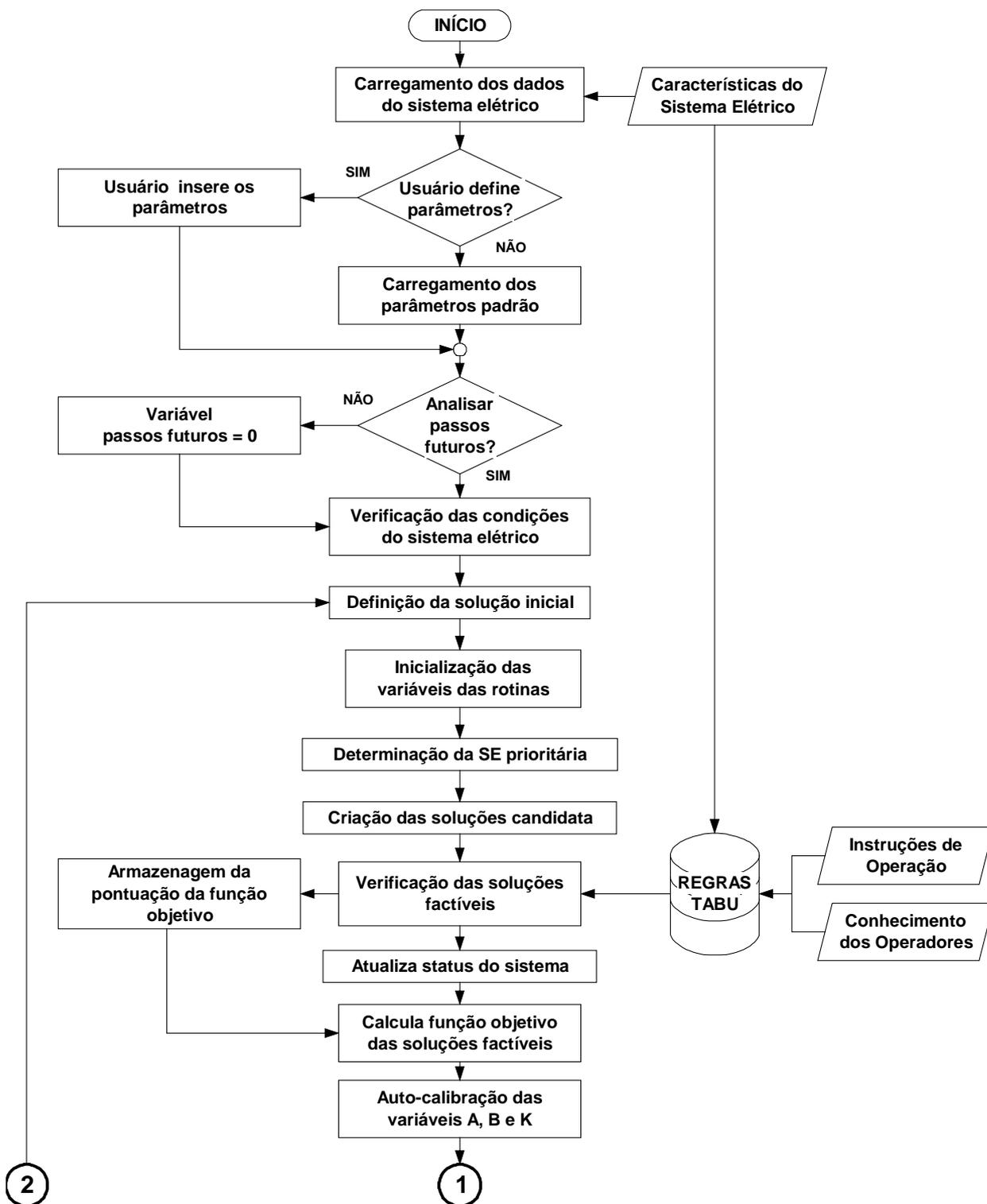
- ✓ Função Objetivo – Totalização da função objetivo apurada em cada iteração;
- ✓ Tempo Computacional – Totalização do tempo gasto no processamento de cada iteração. Não são contabilizados os tempos de espera por ações do usuário;
- ✓ Fator Prioridade – Taxa em porcentagem que expressa a eficiência com que o algoritmo efetuou a recomposição da subestação prioritária do

sistema. Exemplo: Em um sistema com 20 subestações, supondo-se que a décima subestação a ser energizada é a mais prioritária do sistema. Verifica-se um Fator Prioridade de 50%;

- ✓ Fator Ganho – Taxa em porcentagem que expressa a eficiência com que o algoritmo restabeleceu a maior quantidade de subestações na primeira metade do processo, levando-se em consideração a prioridade de cada subestação. Ele é medido através da função objetivo acumulada na metade e no final do processo. Exemplo: Ainda num sistema de 20 barras, supondo-se a função objetivo acumulada em 75 pontos na décima iteração e 100 pontos na vigésima iteração. Portanto, verifica-se um Fator Ganho de 75%, ou seja, na metade do processo de recomposição 75% das subestações já haviam sido recompostas.

4.2.10 - Fluxograma da BTSA

Baseado nos elementos descritos anteriormente, as Figuras 4.7 e 4.8 apresentam o fluxograma desenvolvido para a BTSA.



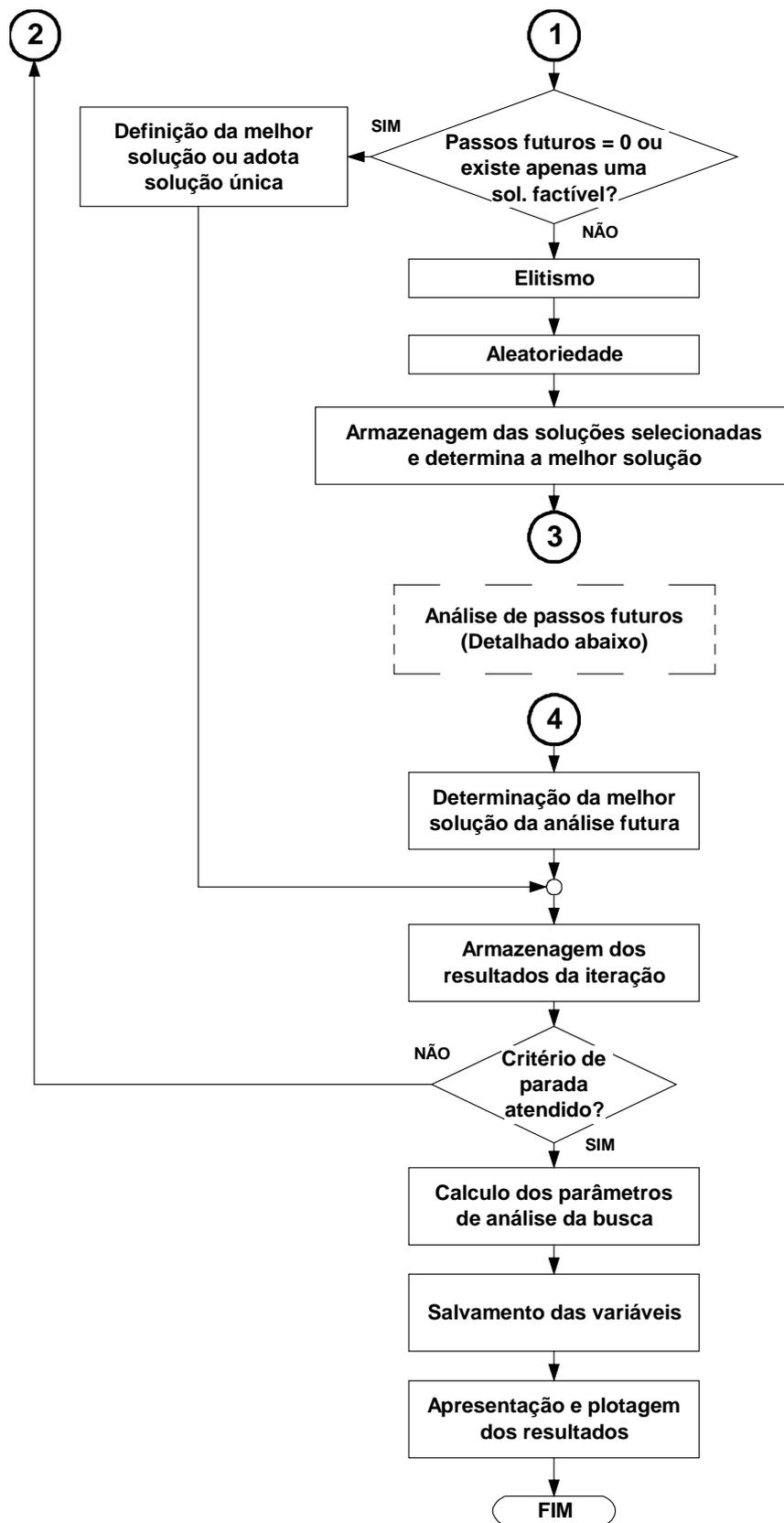


Figura 4.7 - Fluxograma principal BTSA

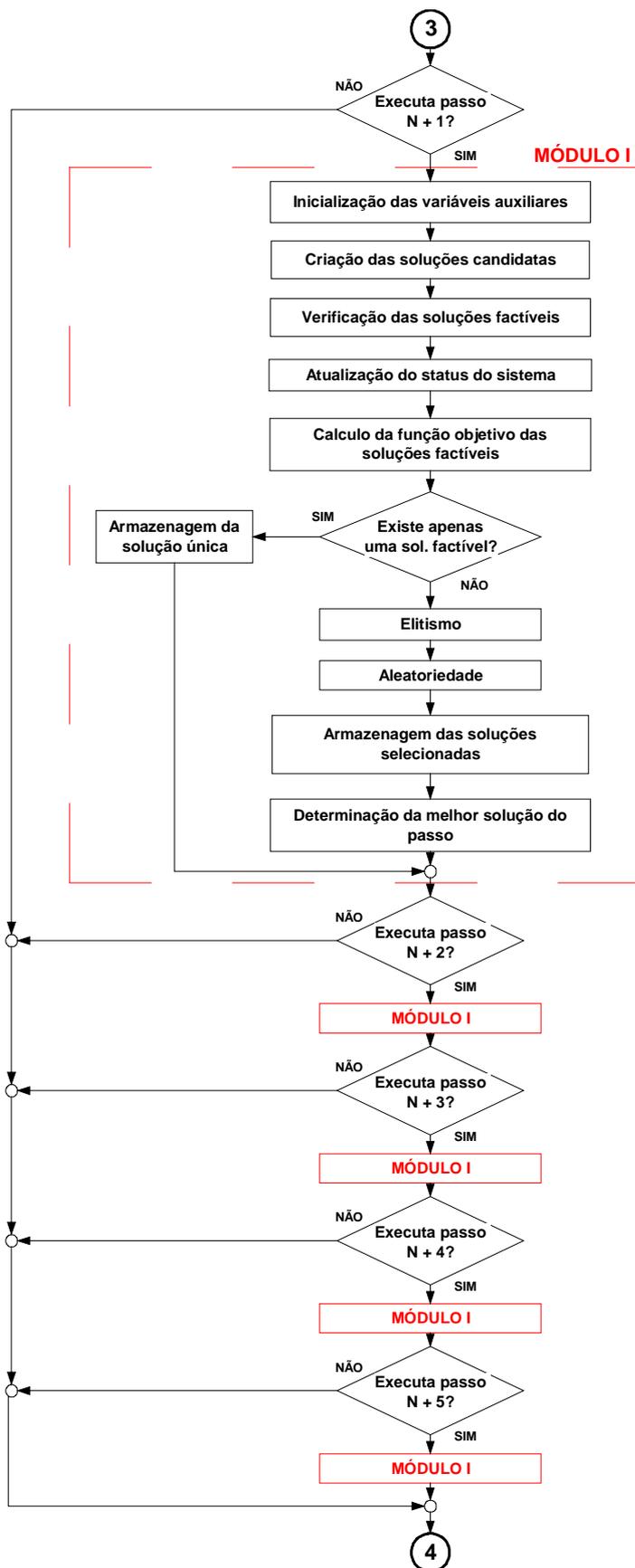


Figura 4.8 - Fluxograma detalhando a análise de passos futuros

4.2.11 - Implementação

A metodologia da BTSA foi implementada através do programa MATLAB[®] Versão 7.0. O problema foi modelado através de um arquivo principal, contendo estrutura básica da técnica, e arquivos de módulos com as rotinas específicas, conforme apresentado na Figura 4.9:

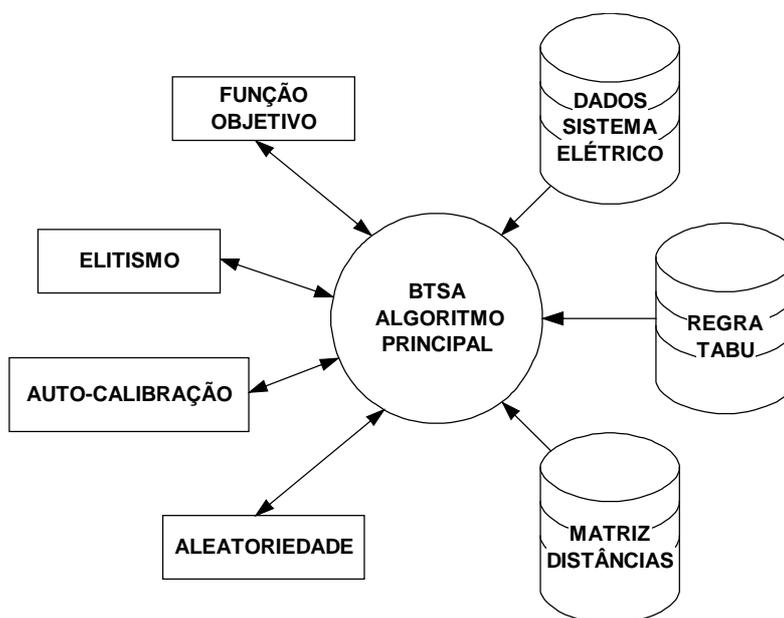


Figura 4.9 - Estrutura do algoritmo implementado

Nota-se que existem dois tipos de scripts interagindo com o algoritmo principal:

- ✓ Base de dados - Apenas fornecendo entradas (parâmetros), como os dados do sistema elétrico;
- ✓ Funções – Recebem dados, analisam e executam uma tarefa específica, retornando uma informação.

O sistema elétrico modelado para a aplicação da técnica desenvolvida é parte do sistema de Mato Grosso do Sul, com foco para a capital - Campo Grande - e suas principais fontes de suprimento, apresentado no Anexo 1.

A prioridade de cada subestação deste sistema foi determinada levando-se em consideração o montante de carga da subestação, importância dessa carga e relevância da subestação para o restante do sistema. A partir desses dados foi elaborada uma lista ordenada da subestação mais prioritária para a menos prioritária, apresentada no Anexo 2.

Estas são, portanto, as ferramentas desenvolvidas e agregadas à concepção original da técnica de BT, bem como os elementos inseridos baseados na BTR e AG, resultando na metodologia da BTSA.

Tais alterações possibilitam sua aplicação na resolução e otimização do problema de recomposição de sistemas elétricos de transmissão.

No próximo capítulo são apresentadas as simulações realizadas em MATLAB[®] aplicando a BTSA na otimização da recomposição do sistema elétrico modelo. Foram simuladas três configurações diferentes para este sistema, aumentando o grau de complexidade do problema.

Serão ainda apresentados os resultados das simulações dos casos utilizando a BTSA e a comparação com as técnicas de BE e BT Original. Por fim é analisada a repetição da simulação para verificar a influência da parcela aleatória da BTSA nos resultados das simulações.

5 - Simulações e Resultados

O algoritmo da BTSA foi simulado utilizando-se um computador Pentium 4 3.0 GHz com 768 Mb de memória RAM.

O critério de parada adotado foi a conclusão do processo de recomposição ou o seu bloqueio devido alguma restrição operativa que impedisse tal conclusão, como por exemplo, impossibilidade de energização de determinada subestação em sentido inverso.

5.1 - Simulação de casos

As simulações de recomposição do sistema elétrico após blecaute foram efetuadas no sistema apresentado na Figura 5.1:

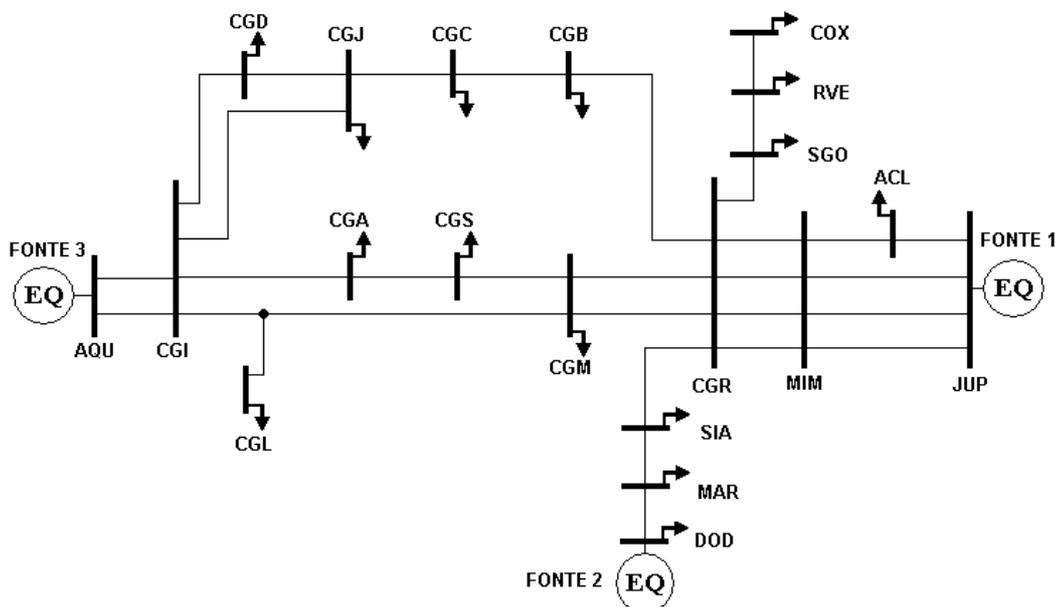


Figura 5.1 - Disponibilidade de fontes de recomposição

Observa-se pelo diagrama do sistema elétrico estudado que existem três fontes possíveis de recomposição: JUP – Fonte 1; DOD – Fonte 2; e AQU – Fonte 3. A partir desta característica foram criados casos para simulação,

incrementando-se o número de fontes disponíveis para recomposição em cada caso, variando de uma a três fontes, conforme analisado adiante.

Destaca-se que o nível de complexidade dos casos é progressivo, tendo em vista que com o maior número de fontes disponíveis, aumentam-se às soluções possíveis e combinações a serem analisadas.

Para permitir a avaliação do seu desempenho, a BTSA foi comparada com outras metodologias utilizadas no processo de recomposição de sistemas elétricos. Destaca-se que foi utilizado o algoritmo da BTSA para todas as metodologias, apenas variando-se seus parâmetros elitismo, aleatoriedade e análise de passos futuros, a fim de permitir análises na mesma base, conforme descrito a seguir.

- ✓ BT - Considerou-se o elitismo e a aleatoriedade fixos em 0% e sem análise de passos futuros, ou seja, a solução com maior função objetivo é considerada a resposta da iteração. Apesar de ser considerada como BT, sua modelagem já considera as adaptações, como por exemplo, da Lista Tabu para Regra Tabu;
- ✓ BE - Considerou-se o elitismo igual a 100%, aleatoriedade igual a 0% e foram analisados os passos futuros, ou seja, todas as soluções factíveis são analisadas. Destaca-se que apesar do termo BE, as soluções não factíveis são eliminadas, reduzindo o número de análises realizadas;

Para todas as simulações realizadas foram adotados os seguintes pesos para a função objetivo:

- ✓ Restabelecimento de subestações (A) – 06;
- ✓ Obediência as Instruções de Operação (B) – 05;
- ✓ Ganhos sistêmicos (C) – 05;
- ✓ Tempo (D) – 05.

5.1.1 - Caso 01 - Jupiá

Neste caso adota-se como condição inicial a disponibilidade de tensão apenas no gerador equivalente da fonte 1, localizado na barra de Jupiá (JUP). Nas demais barras não há fontes disponíveis, sendo consideradas apenas barras de carga, conforme a Figura 5.2.

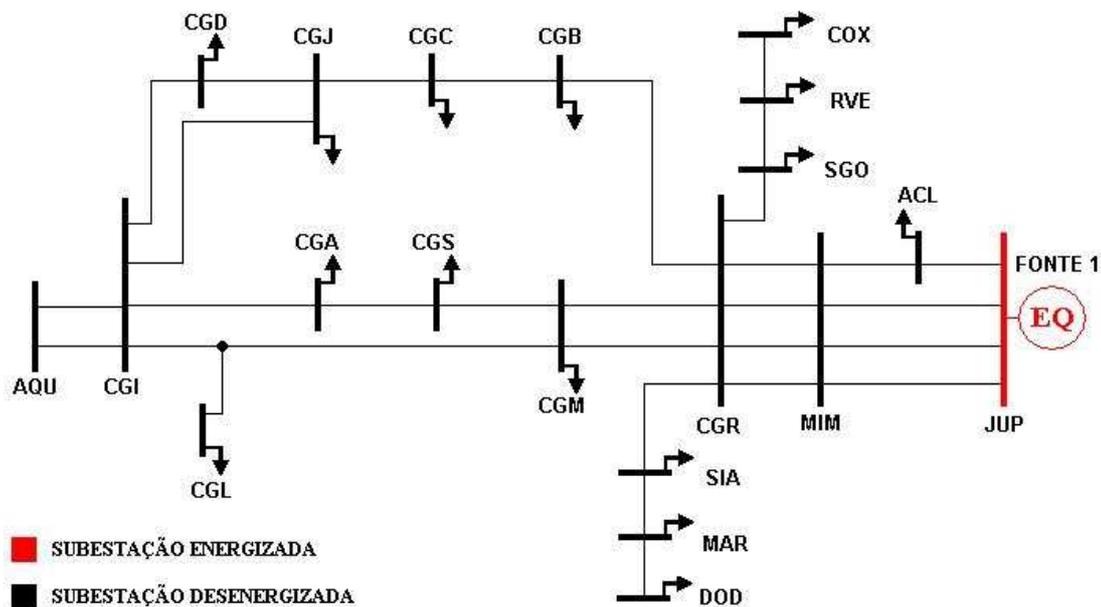


Figura 5.2 – Condição inicial do caso 01

A Figura 5.3 a seguir apresenta a resposta gráfica do processo de recomposição simulado no MATLAB[®] utilizando-se a BTSA.

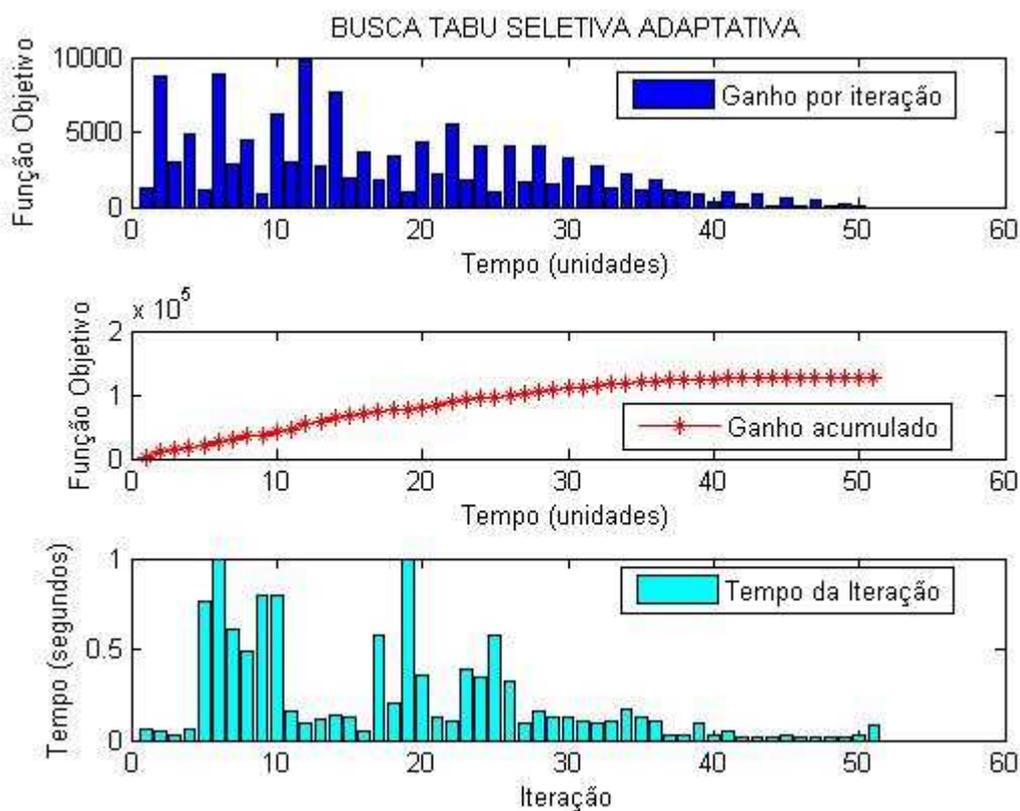


Figura 5.3 - Resultado gráfico da recomposição para o caso 01 aplicando a BTSA

No Anexo 05 é apresentada, como exemplo, a interface com o usuário do algoritmo do MATLAB[®] durante a simulação da recomposição do caso 01. Destaca-se sua interatividade, solicitando entradas do usuário e apresentando resultados parciais a cada iteração, bem como o resultado final do processo de recomposição, com todos seus parâmetros.

O primeiro gráfico da Figura 5.3 apresenta o ganho da função objetivo para cada iteração do processo de recomposição, representado como unidades de tempo. Destaca-se neste gráfico a tendência do processo de busca em obter os maiores ganhos no princípio da recomposição, verificando-se os maiores ganhos da segunda até a décima quarta iteração.

Essa característica se deve a energização das subestações prioritárias nessas iterações iniciais, que é o objetivo da otimização da recomposição. A alternância verificada a cada iteração, entre valores elevados e reduzidos da função objetivo nessa fase do processo, é intrínseca do problema. Isso se deve

ao baixo ganho na energização de linhas em vazio, seguido de ganho elevado quando da energização de uma subestação prioritária.

Esta tendência de otimização rápida no início da recomposição também pode ser verificada através do segundo gráfico, que apresenta a função objetivo acumulada ao longo do processo de recomposição.

Fazendo-se a mesma comparação do primeiro gráfico, até a décima quarta iteração, que corresponde a 27% do processo de recomposição, a função objetivo já atingiu 51% do seu valor total, conforme a Tabela 5.1.

ITERAÇÃO	PORCENTAGEM DO PROCESSO EXECUTADO	PORCENTAGEM DO OBJETIVO ATINGIDO
1	2%	1%
5	10%	15%
10	20%	33%
14	27%	51%
20	39%	64%
25	49%	75%
30	59%	86%
35	69%	93%
40	78%	97%
45	88%	99%
51	100%	100%

Tabela 5.1 – Eficiência da BTSA por iteração para o caso 01

Portanto, conclui-se que no primeiro quarto do processo já se atingiu metade do objetivo desejado para a recomposição. Já na iteração 40, com aproximadamente três quartos do processo concluído, o objetivo está praticamente atingido.

Destaca-se que o valor de 100% do objetivo corresponde ao valor máximo da função objetivo acumulada, obtido na simulação com a BE, tendo em vista que ela assegura a obtenção do máximo global da função. Logo, verifica-se a BTSA também atinge este máximo global.

No terceiro gráfico verifica-se a variação de complexidade do problema ao longo do processo, pois, quando existem poucas alternativas de recomposição o tempo de processamento cai. Já nos picos de tempo identificam-se várias alternativas de recomposição a serem analisadas. Por exemplo, na quinta iteração, o algoritmo prevê, através da análise futura, a possibilidade de energização da subestação CGR e a conseqüente ramificação da árvore de soluções possíveis, conforme a Figura 5.4:

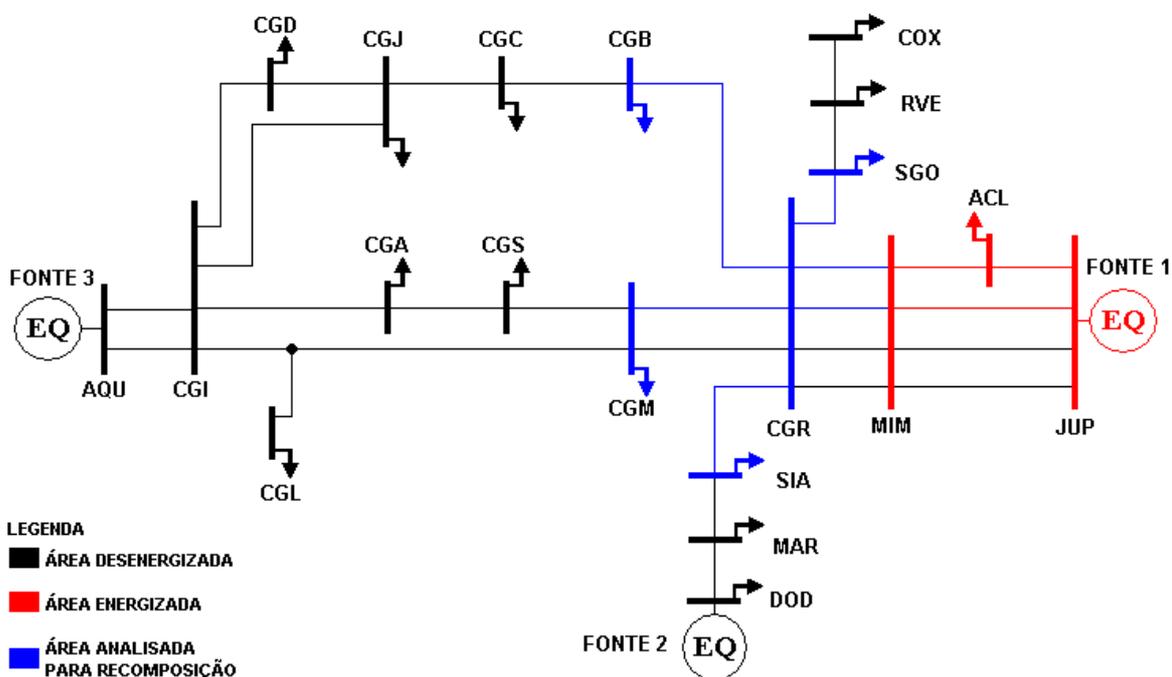


Figura 5.4 – Exemplo da ramificação da árvore de soluções em uma iteração

Observa-se que até a energização da subestação MIM só havia a possibilidade de recomposição de CGR, mesmo com a análise de passos futuros. Ao se energizar a subestação CGR cria-se à possibilidade de recomposição de quatro subestações, SGO, CGB, CGM e SIA.

Portanto, quanto mais ramificada a árvore de soluções possíveis em uma determinada iteração, mais análises são requisitadas ao algoritmo da BTSA, elevando-se seu tempo de processamento.

Aplicando-se agora a BT na resolução do mesmo caso, obtém-se os gráficos apresentados na Figura 5.5:

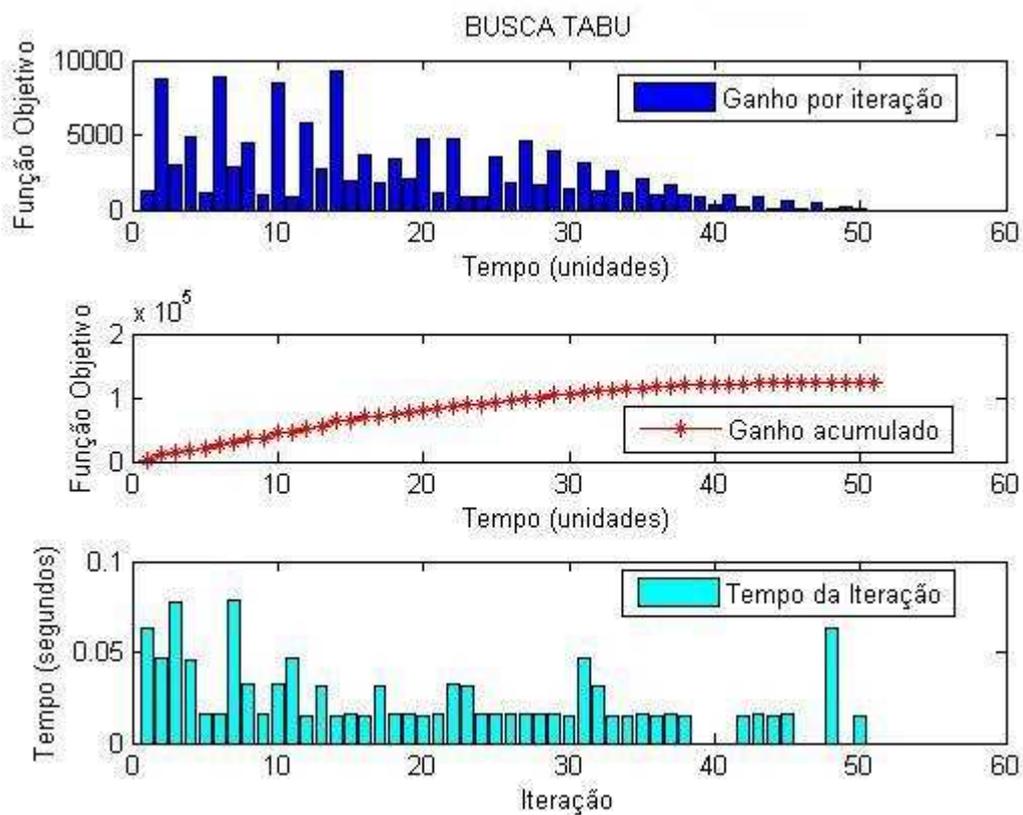


Figura 5.5 - Resultado gráfico da recomposição para o caso 01 aplicando a BT

Destaca-se que a característica de otimização no primeiro quarto do processo é semelhante ao da BTSA, atingindo 50% do objetivo, conforme apresentado na Tabela 5.2. Porém, quando verificado seu comportamento no terceiro quarto, observa-se uma perda de desempenho, atingindo 94% do objetivo contra 97% da BTSA.

ITERAÇÃO	PORCENTAGEM DO PROCESSO EXECUTADO	PORCENTAGEM DO OBJETIVO ATINGIDO
1	2%	1%
5	10%	15%
10	20%	35%
14	27%	50%
20	39%	63%
25	49%	72%
30	59%	82%
35	69%	90%
40	78%	94%
45	88%	97%
51	100%	97%

Tabela 5.2 – Eficiência da BT por iteração para o caso 01

Ao final do processo verifica-se ainda que a BT não atingiu o máximo global da função objetivo, verificado pela BE, ficando em 97%.

Com relação ao tempo de processamento, a BT é consideravelmente mais rápida que as demais técnicas analisadas. Este fato ocorre porque ela não simula as condições futuras das possíveis soluções, reduzindo bastante o número de análises efetuadas pelo algoritmo.

Aplicando-se BE na resolução do mesmo caso, obtém-se os gráficos apresentados na Figura 5.6:

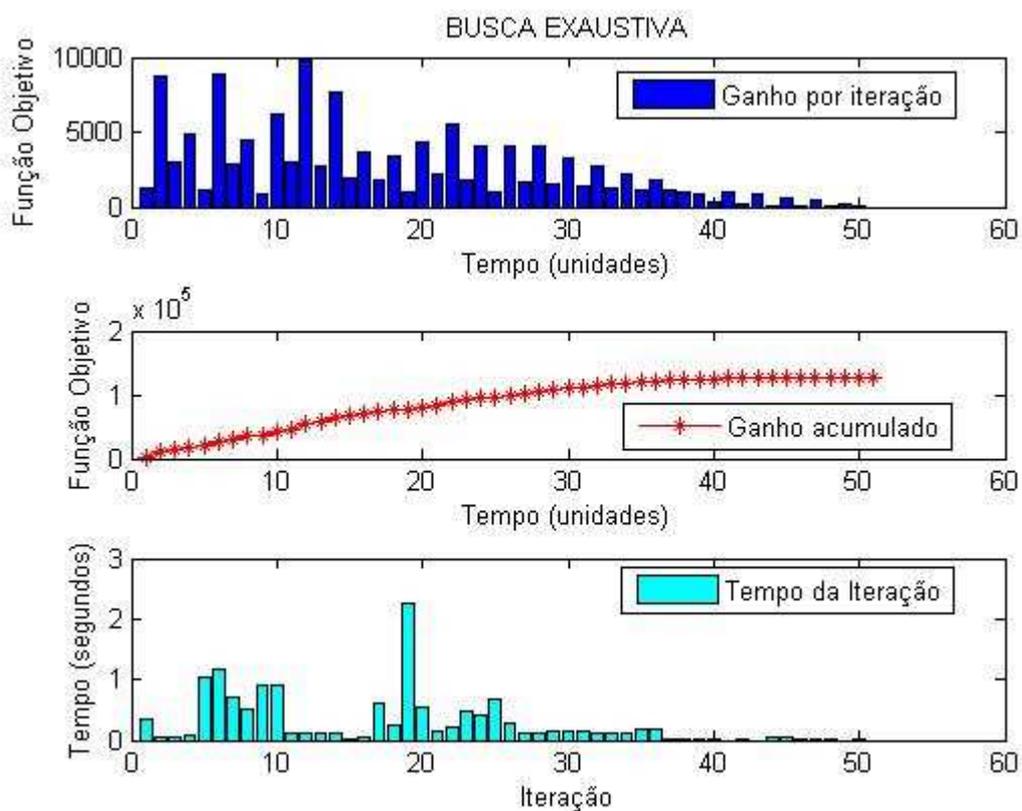


Figura 5.6 - Resultado gráfico da recomposição para o caso 01 aplicando a BE

Os resultados obtidos com a BE são bastante semelhantes aos da BTSA, ou seja, otimização rápida no primeiro quarto e processo quase concluído ao final do terceiro quarto, conforme apresentado na Tabela 5.3.

ITERAÇÃO	PORCENTAGEM DO PROCESSO EXECUTADO	PORCENTAGEM DO OBJETIVO ATINGIDO
1	2%	1%
5	10%	15%
10	20%	33%
14	27%	51%
20	39%	64%
25	49%	75%
30	59%	86%
35	69%	93%
40	78%	97%
45	88%	99%
51	100%	100%

Tabela 5.3 – Eficiência da BE por iteração para o caso 01

A diferença fundamental na comparação das duas técnicas está no tempo de processamento, constantemente inferior na BTSA, conforme verificado no terceiro gráfico da Figura 5.6. Esta característica é justificada pela simulação de todas as soluções factíveis a cada iteração pela BE, elevando o número de análises efetuadas pelo algoritmo.

A Figura 5.7 apresenta a comparação dos resultados obtidos através da simulação das três técnicas analisadas para a resolução do caso 01.

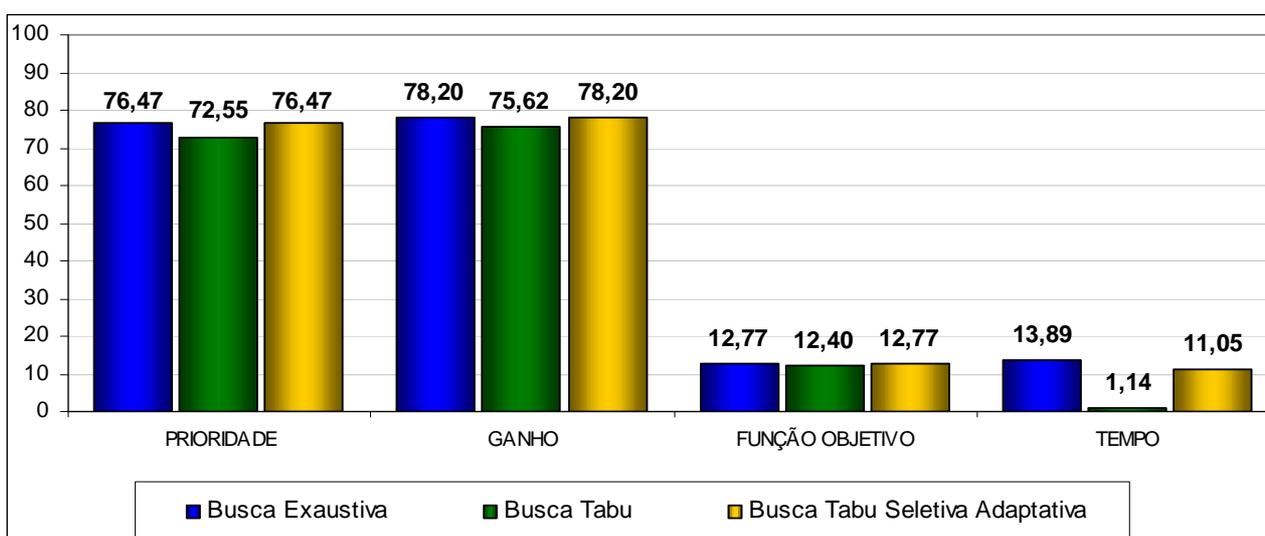


Figura 5.7 - Comparação dos resultados das técnicas – caso 01

Fica evidenciada a característica da BTSA em obter praticamente os mesmos resultados da BE, porém com tempo inferior. Já a BT apresenta resultados piores que as demais, porém é mais veloz.

5.1.2 - Caso 02 – Dourados das Nações e Aquidauana

Neste caso adota-se como condição inicial a disponibilidade de tensão simultaneamente nos geradores equivalentes das fontes 2 e 3, localizados nas barras de Dourados das Nações (DOD) e Aquidauana (AQU), respectivamente.

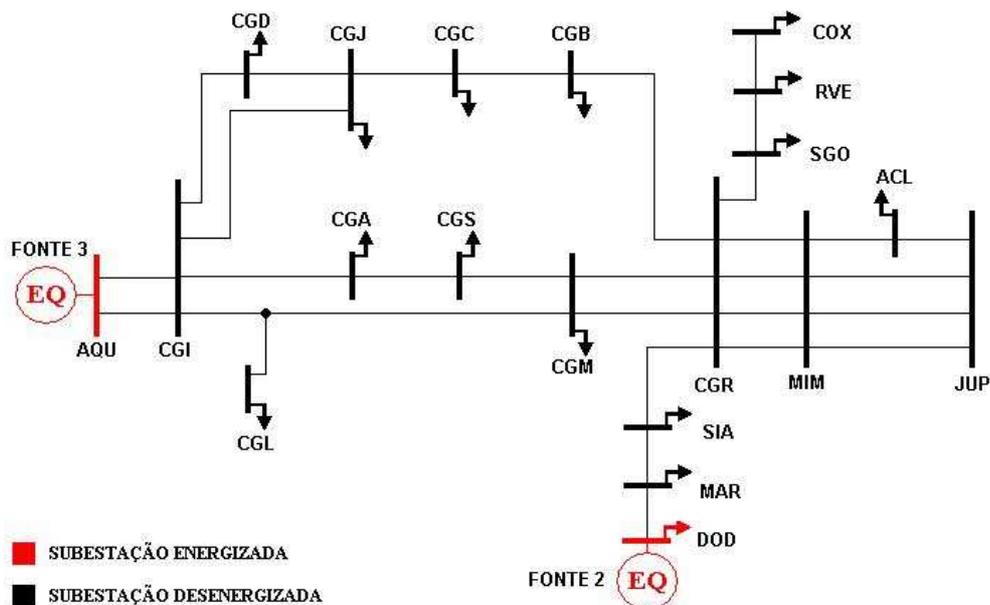


Figura 5.8 – Condição inicial do caso 02

Nas Figuras 5.9, 5.10 e 5.11 são apresentados os resultados para o caso 02, em forma gráfica, das simulações realizadas no MATLAB[®] para a BTSA, BT e BE, respectivamente.

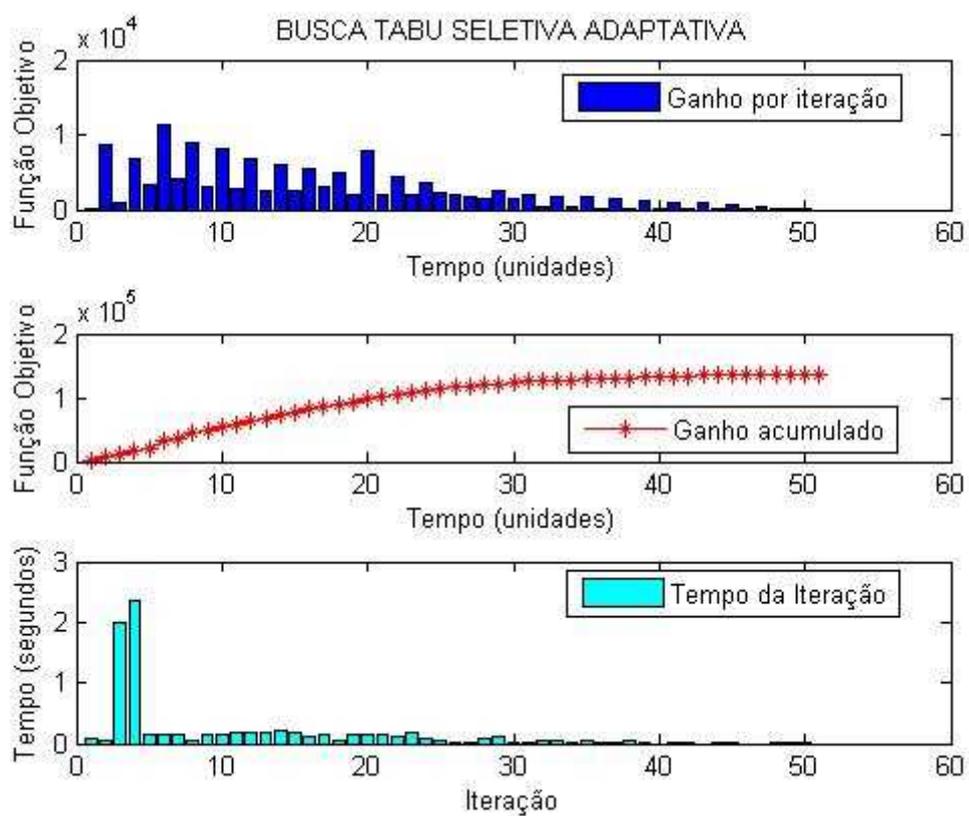


Figura 5.9 - Resultado gráfico da recomposição para o caso 02 aplicando a BTSA

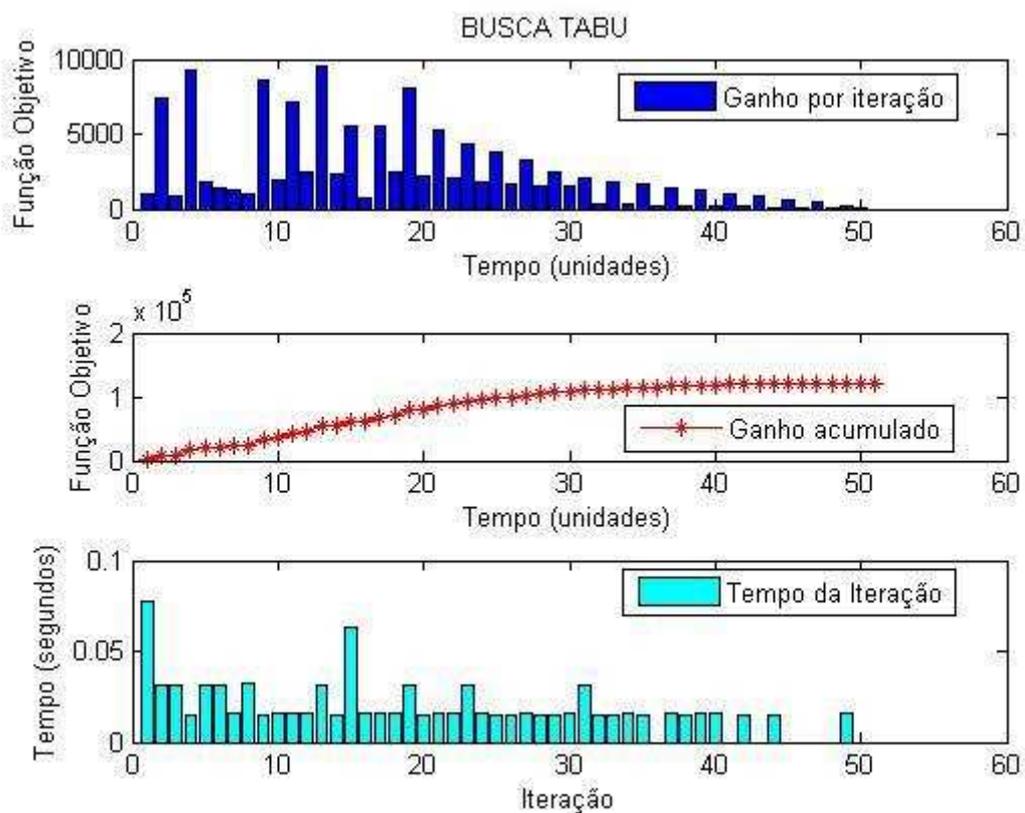


Figura 5.10 - Resultado gráfico da recomposição para o caso 02 aplicando a BT

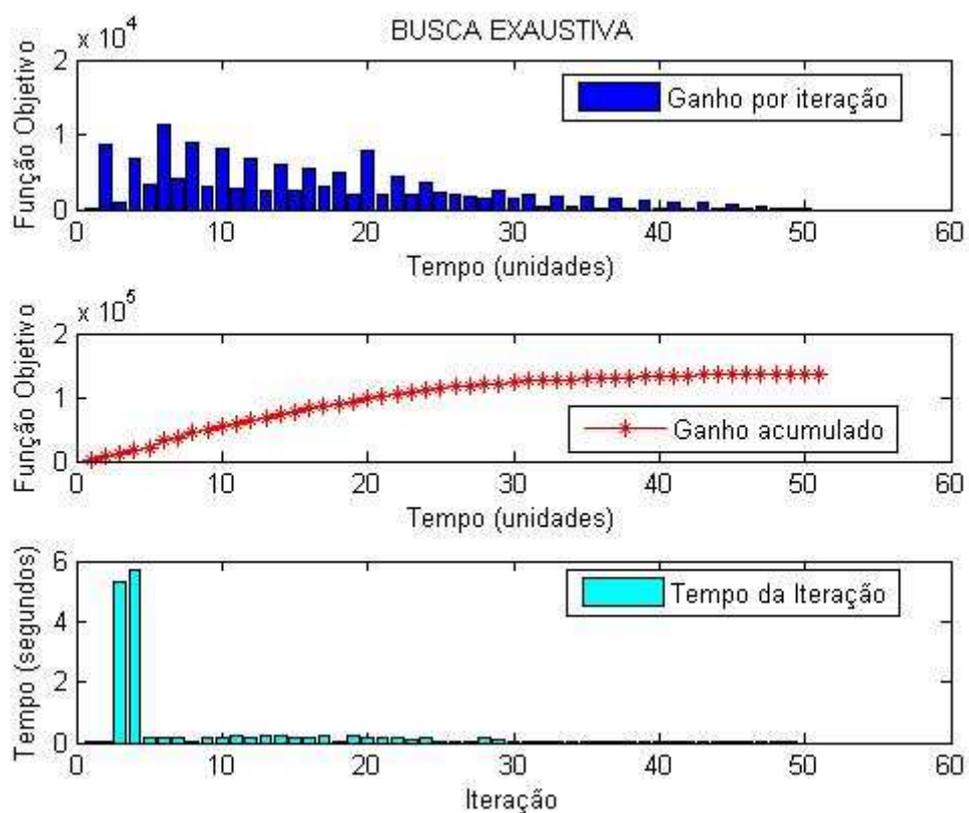


Figura 5.11 - Resultado gráfico da recomposição para o caso 02 aplicando a BE

Assim como no caso 01, os resultados obtidos para a BTSA e BE são bastante semelhantes em relação à obtenção dos maiores ganhos no princípio da recomposição. Já a BT apresentou queda acentuada no desempenho, conforme verificado na Tabela 5.4:

ITERAÇÃO	PORCENTAGEM DO PROCESSO EXECUTADO	PORCENTAGEM DO OBJETIVO ATINGIDO		
		BTSA	BT	BE
1	2%	0%	1%	0%
5	10%	15%	15%	15%
10	20%	41%	25%	41%
14	27%	54%	41%	54%
20	39%	73%	59%	73%
25	49%	84%	72%	84%
30	59%	90%	79%	90%
35	69%	95%	84%	95%
40	78%	97%	87%	97%
45	88%	99%	89%	99%
51	100%	100%	89%	100%

Tabela 5.4 – Comparação de eficiência das técnicas por iteração para o caso 02

Nota-se ainda que a BT não atinge o máximo global da função objetivo, ficando em apenas 89%. Esse fato ocorre porque existe uma maior disponibilidade de caminhos para recompor, porém eles não são as fontes normais de alimentação segundo as instruções de operação.

Logo, por não analisar os passos futuros, o algoritmo da BT não enxerga as subestações prioritárias, as energizando posteriormente com conseqüente perda de eficiência.

Ou seja, quando o sistema está sendo recomposto em sentido normal, o algoritmo da BT consegue chegar a prioridade de forma fluente. Já na recomposição em sentido inverso ele se perde por ausência de capacidade preditiva.

Com relação ao tempo de processamento, observa-se que houve uma redução no tempo verificado com a BTSA em relação ao caso 01 (de 11,05 para

8,16 segundos). Já com a BE ocorreu o contrário, o tempo de processamento aumentou em relação ao caso 01 (de 13,89 para 15,33 segundos).

Esse comportamento ocorre porque neste caso 02 o processo de recomposição apresenta apenas um ponto significativo de ramificação da árvore de soluções. Este ponto é identificado nos gráficos de tempo de processamento nas iterações três e quatro, que representa as análises futuras associadas a energização da subestação CGI, conforme ilustrado na Figura 5.12:

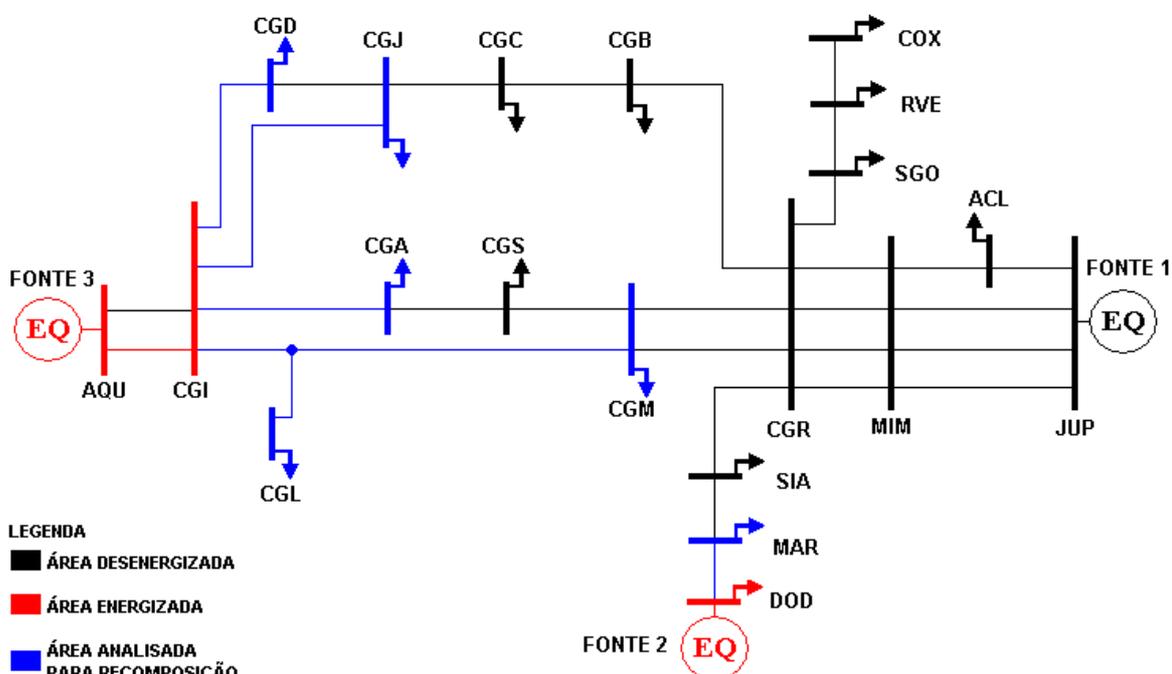


Figura 5.12 – Exemplo da ramificação da árvore de soluções em uma iteração

Quando CGI é energizada cria-se a possibilidade de energização de cinco subestações: CGD, CGJ, CGA, CGM e CGL e MAR. Logo, haverá muitas soluções possíveis a serem analisadas pelo algoritmo, elevando exponencialmente o tempo de processamento. Como a BTSA analisa apenas uma porcentagem dessas soluções, seu tempo não será tão comprometido quanto o tempo da BE.

Como não ocorreram novos pontos de ramificação durante o restante do processo, conforme identificado no gráfico de tempo, houve uma melhoria no desempenho em relação ao tempo verificado no caso 01 pela BTSA.

A Figura 5.13 apresenta de forma resumida os resultados obtidos para a simulação do caso 02.

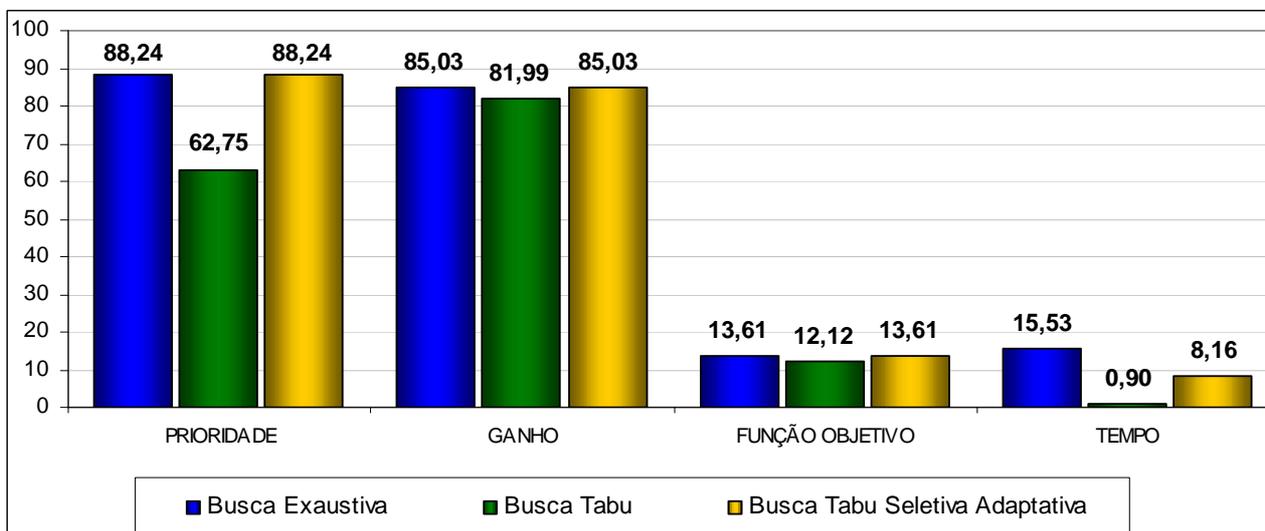


Figura 5.13 - Comparação dos resultados das técnicas – caso 02

O gráfico confirma a queda no desempenho da BT em relação as demais técnicas analisadas, bem como a melhoria do tempo da BTSA quando comparada a BE.

5.1.3 - Caso 03 – Jupiá, Dourados das Nações e Aquidauana

Neste caso adota-se como condição inicial a disponibilidade de tensão simultaneamente nos geradores equivalentes das fontes 1, 2 e 3, localizados nas barras de Jupiá (JUP), Dourados das Nações (DOD) e Aquidauana (AQU), respectivamente.

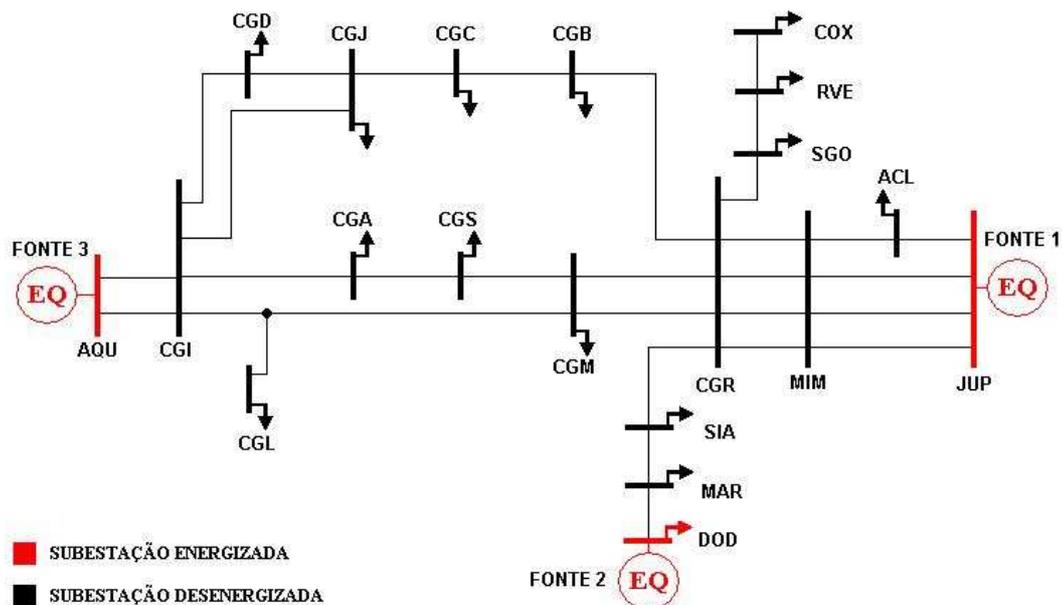


Figura 5.14 – Condição inicial do caso 03

Nas Figuras 5.15, 5.16 e 5.17 são apresentados os resultados para o caso 03, em forma gráfica, das simulações realizadas no MATLAB[®] para a BTSA, BT e BE, respectivamente.

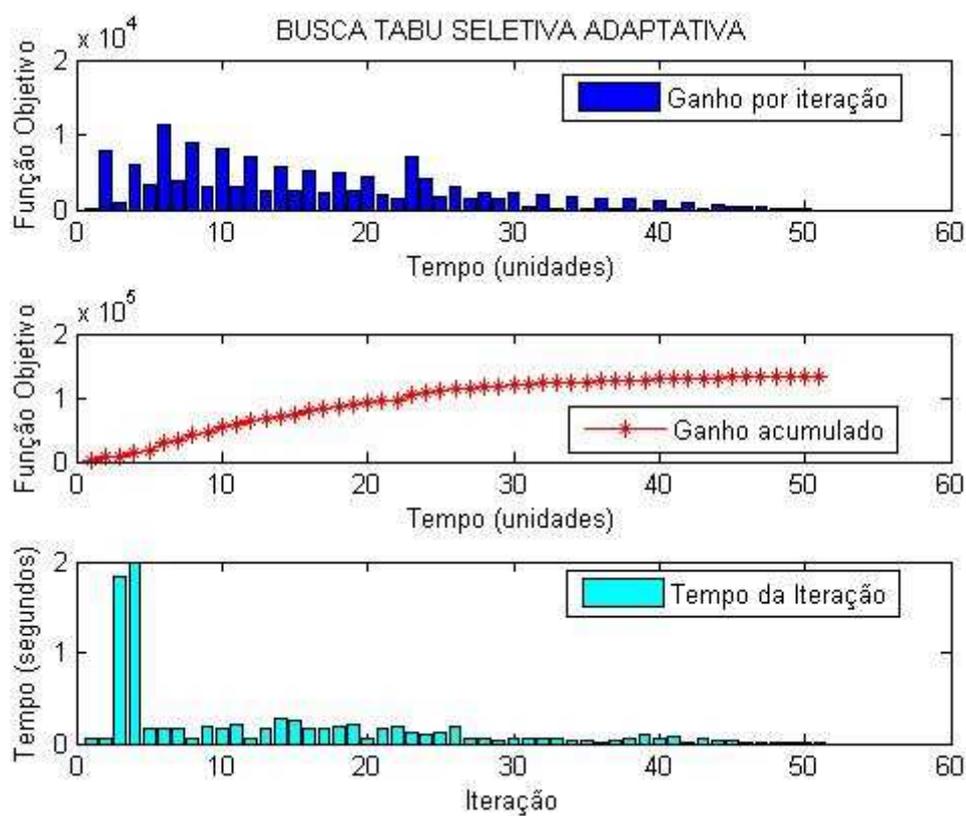


Figura 5.15 - Resultado gráfico da recomposição para o caso 03 aplicando a BTSA

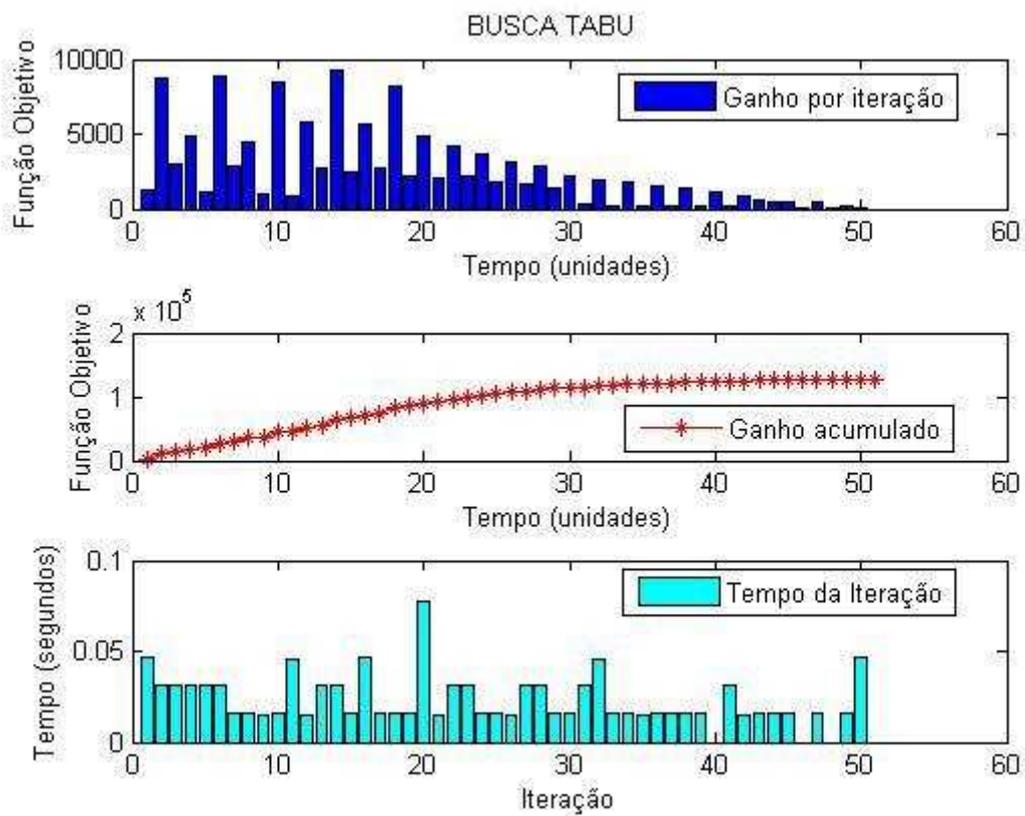


Figura 5.16 - Resultado gráfico da recomposição para o caso 03 aplicando a BT

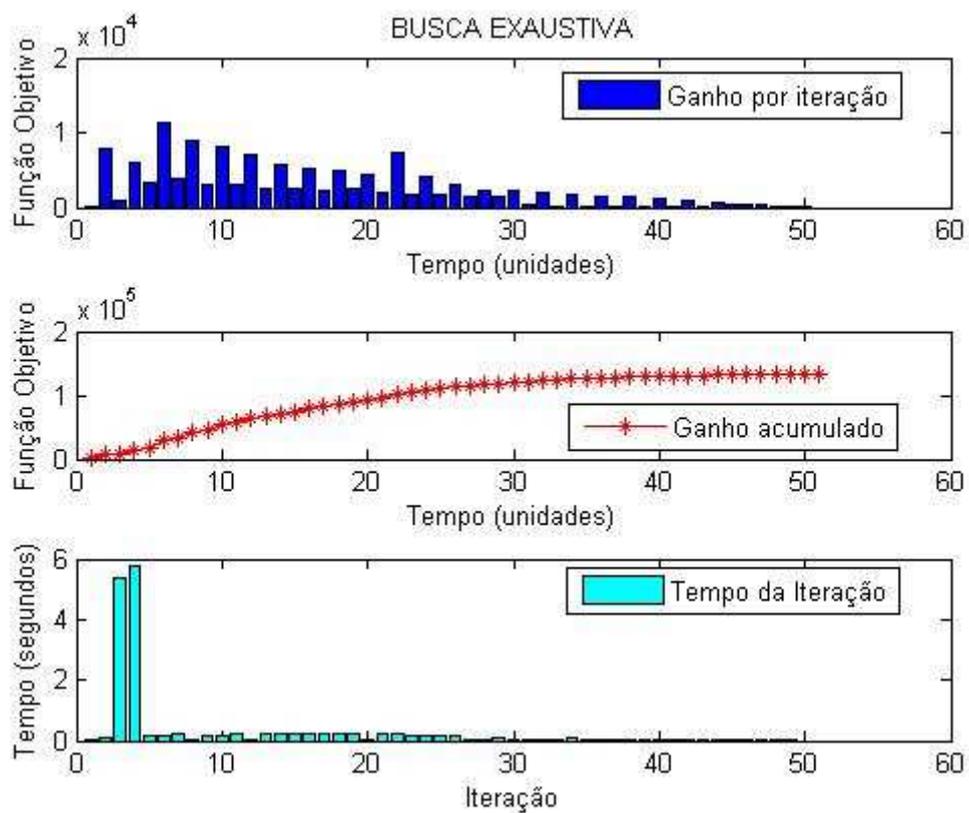


Figura 5.17 - Resultado gráfico da recomposição para o caso 03 aplicando a BE

O caso 03 confirma a semelhança de resultados obtidos para a BTSA e BE em relação à obtenção dos maiores ganhos no princípio da recomposição. Novamente a BT apresentou queda acentuada no desempenho, conforme verificado na Tabela 5.5:

ITERAÇÃO	PORCENTAGEM DO PROCESSO EXECUTADO	PORCENTAGEM DO OBJETIVO ATINGIDO		
		BTSA	BT	BE
1	2%	0%	1%	0%
5	10%	14%	14%	14%
10	20%	40%	34%	40%
14	27%	54%	48%	54%
20	39%	70%	67%	70%
25	49%	82%	78%	83%
30	59%	90%	86%	91%
35	69%	94%	90%	94%
40	78%	97%	93%	98%
45	88%	99%	95%	99%
51	100%	99%	96%	100%

Tabela 5.5 – Comparação de eficiência das técnicas por iteração para o caso 03

As conclusões expostas para o caso 02 podem ser estendidas para o caso 03, tendo em vista que as características e resultados obtidos foram bastante semelhantes.

A Figura 5.18 apresenta de forma resumida os resultados obtidos para a simulação do caso 03.

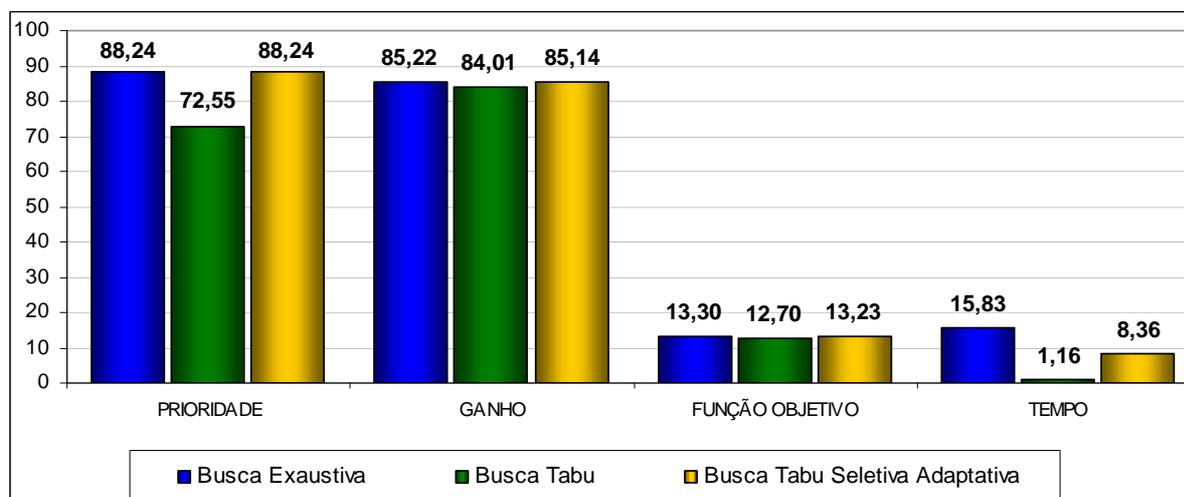


Figura 5.18 - Comparação dos resultados das técnicas – caso 03

5.2 - Avaliação da aleatoriedade

Como a BTSA possui uma parcela aleatória intrínseca a seu processo de busca, foram efetuadas repetições de simulação, objetivando verificar se esse fator poderia prejudicar seu desempenho e ocasionar grandes variações de uma simulação para outra.

Foram realizadas dez simulações considerando exatamente os mesmos parâmetros e condições, baseados no caso 03, fontes JUP, DOD e AQU disponíveis, resultando nos valores apresentados na Tabela 5.6:

REPETIÇÃO DA SIMULAÇÃO DA BUSCA TABU SELETIVA ADAPTATIVA				
Fontes disponíveis: JUPIÁ, DOURADOS e AQUIDAUANA				
REPETIÇÃO	FATORES ANALISADOS			
	PRIORIDADE %	GANHO %	FUNÇÃO OBJETIVO x 10 ⁴	TEMPO segundos
1	88,2353	85,1738	13,2588	7,9210
2	88,2353	85,1738	13,2588	8,1070
3	88,2353	85,2181	13,2986	8,0470
4	88,2353	85,1624	13,2486	7,5640
5	88,2353	85,1624	13,2486	7,5640
6	88,2353	85,1624	13,2486	7,8130
7	88,2353	85,1624	13,2486	8,0300
8	88,2353	85,2181	13,2986	7,7950
9	88,2353	85,1738	13,2588	7,6720
10	88,2353	85,1738	13,2588	7,9760
MÉDIA	88,24	85,18	13,26	7,85
MELHOR SOLUÇÃO	88,24	85,22	13,30	7,56
DESVIO (%)	0,00%	-0,05%	-0,27%	3,77%

Tabela 5.6 – Repetição da simulação de caso para a BTSA

Destaca-se que em todas as repetições da recomposição do sistema a BTSA atingiu o máximo global para o Fator Prioridade, obtido através da BE nas simulações do caso 03.

Os fatores Ganho e Função Objetivo apresentaram desvios pouco relevantes da melhor solução em relação à média das soluções, ficando abaixo de 1%.

Apenas o tempo de processamento apresentou desvio significativo, permanecendo em 3,77%. Porém, esse desvio representa apenas 0,29 segundo, não representando prejuízo ao desempenho da BTSA.

6 - Conclusões

A recomposição de sistemas elétricos após blecautes é uma atividade de grande responsabilidade, face seu impacto social e econômico para a população. O desenvolvimento de ferramentas computacionais de otimização e apoio à tomada de decisão, para utilização nos Centros de Operação, é uma tendência das empresas do setor elétrico que vem evoluindo nos últimos tempos.

A técnica de BT e suas variações são amplamente aplicadas ao problema de recomposição de sistema de distribuição, notoriamente combinatório. Porém, em função de suas características, elas não são aplicáveis ao problema de recomposição de sistemas de transmissão, tratando-se de um problema seqüencial.

A metodologia desenvolvida neste trabalho para solução deste problema, denominada BTSA, permite uma análise do seu comportamento futuro, trazendo fatores determinantes ao presente como subsídios para a tomada de decisão.

Seu desenvolvimento é baseado nos conceitos da BT e sua variação BTR. Foram ainda agregadas características da técnica de AG.

O processo de análise futura é provido de mecanismos para otimizar seu algoritmo e evitar demasiado esforço computacional. Esses mecanismos, denominados Elitismo e Aleatoriedade, agregam intensificação e diversificação, respectivamente, à metodologia. Outro recurso desenvolvido é a determinação de bordas de busca, focando o processo em regiões eqüidistantes do seu objetivo. Esses elementos representam sua denominação Seletiva.

Destaca-se que seus parâmetros são auto-ajustáveis a cada iteração do processo, de acordo com as condições do problema, representando sua Adaptabilidade.

Sua modelagem tornou-se trabalhosa, apesar de sua conceituação simples e intuitiva, devido à complexidade do problema de recomposição de sistemas elétricos. Para problemas mais simples a aplicação da BTSA torna-se conseqüentemente mais prática.

Pelos resultados verificados nas simulações comparando a BTSA com outras metodologias, conclui-se que ela alcança ganhos bastante semelhantes aos da BE e superiores aos da BT original. Destaca-se que ela atingiu o máximo global do problema em todas as simulações, apesar de sua parcela aleatória. Essa afirmação pode ser comprovada através de análise empírica do sistema elétrico estudado.

Seu ganho nos critérios analisados em relação à BE começa a ser evidenciado conforme aumenta a complexidade do problema, quando o tempo de processamento da BTSA cai significativamente quando comparado a BE. Por exemplo, dos resultados das simulações do caso 01 para o caso 03 a relação tempo de processamento BTSA / BE caiu de 85,7% para 52,5%.

Sua aplicação é recomendada para o desenvolvimento ou otimização de sistemas especialistas, tendo em vista que a BTSA pode gerar uma base de conhecimento ou compartilhar uma base já existente.

Para o desenvolvimento futuro desta metodologia, os seguintes aspectos podem ser pesquisados e abordados:

- ✓ Inclusão de uma ferramenta para otimização da formulação e manutenção da base de regras do sistema elétrico;
- ✓ Otimização dos ganhos sistêmicos atribuídos a determinadas condições do sistema elétrico, melhorando sua performance;
- ✓ Implementação de fluxo de potência para pontuação das soluções selecionadas ou a validação da resposta obtida;
- ✓ Melhoria da programação do algoritmo, principalmente na etapa de análise futura e retroação ao presente, reduzindo o tempo de processamento.

Sugere-se também a aplicação da BTSA em problemas clássicos e menos complexos sob o ponto de vista de volume de informações a serem modeladas, como por exemplo, o problema de roteamento de veículos [26] e o problema do caixeiro viajante [27]. Isso permitiria demandar maior tempo e esforço na análise e desenvolvimento da técnica BTSA, ao invés da modelagem do problema. Permitiria ainda uma melhor comparação com outras técnicas de inteligência artificial, como Redes Neurais e AG.

ANEXO 2 – Resumo dos Trabalhos Produzidos

O desenvolvimento deste projeto de pesquisa produziu até o estágio atual os seguintes trabalhos:

- 1 ***Sistema Especialista para Treinamento e Simulação da Recomposição do Sistema Elétrico ENERSUL***. Apresentado no IX EDAO – Encontro para Debates de Assuntos de Operação, 2007, Rio Quente – GO [28].

Resumo - Este artigo tem como objetivo apresentar a experiência da ENERSUL, em parceria com a UFMS, no desenvolvimento e implementação de um Sistema Especialista para treinamento de operadores e apoio à tomada de decisão em tempo real para recomposição do sistema. O REC_ESP encontra-se em fase de treinamento para os operadores e implantação no Centro de Operação do Sistema Enersul e vem demonstrando resultados satisfatórios e boa aceitação pelos operadores.

- 2 ***Methodology for Service Restoration based Adaptive-Selective Tabu Search - ASTS***. Apresentado no 7th ISDA - *International Conference on Intelligent Systems Design and Applications*, 2007, Rio de Janeiro – RJ [29].

Abstract - The objective this paper is to present the development methodology, called ASTS, proposed to optimization of the transmission power systems restoration. The methodology is based on Tabu Search (TS) and Reactive Tabu Search (RTS) techniques with elements similar to those found in other Artificial Intelligent Methods, as elitism, aleatority and future analysis. These elements provide diversification and intensification mechanism to the search, beside of the predictive controlled characteristics. The proposed method is applied to the 20-nodes transmission real system and the simulations results obtained are satisfactory as well as the comparisons with other methodologies.

ANEXO 3 – Lista de prioridade de subestações

Nº	SE	NOTA	PARTICIPAÇÃO
1	CGC	250	14,6%
2	CGM	175	10,2%
3	CGR	160	9,3%
4	DOD	150	8,7%
5	JUP	140	8,2%
6	MIM	130	7,6%
7	AQU	125	7,3%
8	CGI	100	5,8%
9	CGA	90	5,2%
10	CGB	80	4,7%
11	CGS	75	4,4%
12	MAR	60	3,5%
13	CGJ	40	2,3%
14	CGD	35	2,0%
15	CGL	30	1,7%
16	SGO	25	1,5%
17	SIA	20	1,2%
18	RVE	15	0,9%
19	COX	10	0,6%
20	ACL	5	0,3%

Tabela A.1 – Prioridade de Subestações

ANEXO 4 – Matriz distância entre subestações

		SUBESTAÇÃO PRIORITÁRIA																			
		CGR	CGB	CGM	CGC	CGS	CGJ	CGA	CGD	CGL	CGI	JUP	MIM	DOD	MAR	SIA	AQU	SGO	RVE	COX	ACL
SUBESTAÇÃO ENERGIZADA - BORDA	CGR	19	1	1	3	3	5	5	5	2	3	3	1	3	1	0	5	0	1	2	2
	CGB	1	19	3	1	5	3	7	5	4	5	5	3	5	3	2	7	2	3	4	4
	CGM	1	3	19	5	1	3	3	3	0	1	5	3	5	3	2	3	2	3	4	4
	CGC	3	1	5	19	7	1	5	3	4	3	7	5	7	5	4	5	4	5	6	6
	CGS	3	5	1	7	19	5	1	5	2	3	7	5	7	5	4	5	4	5	6	6
	CGJ	5	3	3	1	5	19	3	1	2	1	9	7	9	7	6	3	6	7	8	8
	CGA	5	7	3	5	1	3	19	3	2	1	9	7	9	7	6	3	6	7	8	8
	CGD	5	5	3	3	5	1	3	19	2	1	9	7	9	7	6	3	6	7	8	8
	CGL	2	4	0	4	2	2	2	2	19	0	6	4	6	4	3	2	3	4	5	5
	CGI	3	5	1	3	3	1	1	1	0	19	7	5	7	5	4	1	4	5	6	6
	JUP	3	5	5	7	7	9	9	9	6	7	19	1	7	5	4	9	4	5	6	0
	MIM	1	3	3	5	5	7	7	7	4	5	1	19	5	3	2	7	2	3	4	0
	DOD	3	5	5	7	7	9	9	9	6	7	7	5	19	1	2	9	4	5	6	6
	MAR	1	3	3	5	5	7	7	7	4	5	5	3	1	19	0	7	2	3	4	4
	SAI	0	2	2	4	4	6	6	6	3	4	4	2	2	0	19	6	1	2	3	3
	AQU	5	7	3	5	5	3	3	3	2	1	9	7	9	7	6	19	6	7	8	8
	SGO	0	2	2	4	4	6	6	6	3	4	4	2	4	2	1	6	19	0	1	3
	RVE	1	3	3	5	5	7	7	7	4	5	5	3	5	3	2	7	0	19	0	4
	COX	2	4	4	6	6	8	8	8	5	6	6	4	6	4	3	8	1	0	19	5
ACL	2	4	4	6	6	8	8	8	5	6	0	0	6	4	3	8	3	4	5	19	

Tabela A.2 – Distância entre Subestações

ANEXO 5 – Simulação em MATLAB ® do algoritmo implementado

Projeto Mestrado em Engenharia Elétrica UFMS
Antônio Maurício de Matos Gonçalves
Busca Tabu Seletiva Adaptativa Aplicada à Recomposição da Sistemas Elétricos de Subtransmissão -
Versão 3.0

Deseja definir os parâmetros da busca? (1-UTILIZAR PADRÃO 2-SIM): 1

1) Fonte(s) disponível(is) para recomposição:
- Existe tensão na barra de 138 kV da SE JUP.

Parâmetros padrão:

2) Pesos da função objetivo (Valor inteiro de 0 a 10):
(a) Prioridade de recomposição das SEs: 6
(b) Obediência as Instruções de Operação: 5
(c) Ganho sistêmico: 5
(d) Tempo de restabelecimento: 5

3) Deseja efetuar análise de passos futuros durante a busca [1-SIM(PADRÃO) 2-NÃO]: 1

Parâmetros auto-calibrados para a iteração 1:

Subestação prioritária a ser recomposta: CGC
Subestação energizada mais próxima da prioritária: JUP

Resultado da iteração 1:

Solução trivial do passo 1: JUP_D25
Solução efetiva do passo 1 baseada na análise futura: JUP_D25
Função Objetivo: 1250

Pressione qualquer tecla para continuar...

Parâmetros auto-calibrados para a iteração 2:

Subestação prioritária a ser recomposta: CGC
Subestação energizada mais próxima da prioritária: ACL

Resultado da iteração 2:

Solução trivial do passo 2: MIM_D29
Solução efetiva do passo 2 baseada na análise futura: MIM_D29
Função Objetivo: 8791.1765

Pressione qualquer tecla para continuar...

Parâmetros auto-calibrados para a iteração 3:

Subestação prioritária a ser recomposta: CGC

Subestação energizada mais próxima da prioritária: MIM

Resultado da iteração 3:

Solução trivial do passo 3: JUP_D26

Solução efetiva do passo 3 baseada na análise futura: JUP_D26

Função Objetivo: 3058.8235

Pressione qualquer tecla para continuar...

Parâmetros auto-calibrados para a iteração 4:

Subestação prioritária a ser recomposta: CGC

Subestação energizada mais próxima da prioritária: MIM

Resultado da iteração 4:

Solução trivial do passo 4: MIM_D30

Solução efetiva do passo 4 baseada na análise futura: MIM_D30

Função Objetivo: 4838.2353

Pressione qualquer tecla para continuar...

Parâmetros auto-calibrados para a iteração 5:

Subestação prioritária a ser recomposta: CGC

Subestação energizada mais próxima da prioritária: MIM

Número de passos para análise futura: 5

Número de soluções factíveis menor ou igual a 3. Todas serão avaliadas!

Área de recomposição em configuração normal? SIM

Elitismo: 100 %

Aleatoriedade: 0 %

Processando...

Resultado da iteração 5:

Solução trivial do passo 5: MIM_D33

Solução efetiva do passo 5 baseada na análise futura: MIM_D33

Função Objetivo: 1082.3529

Pressione qualquer tecla para continuar...

Parâmetros auto-calibrados para a iteração 6:

Subestação prioritária a ser recomposta: CGC

Subestação energizada mais próxima da prioritária: MIM

Número de passos para análise futura: 5

Número de soluções factíveis menor ou igual a 3. Todas serão avaliadas!

Área de recomposição em configuração normal? SIM

Elitismo: 100 %

Aleatoriedade: 0 %

Processando...

Resultado da iteração 6:

Solução trivial do passo 6: CGR_D37

Solução efetiva do passo 6 baseada na análise futura: CGR_D37

Função Objetivo: 8867.6471

Pressione qualquer tecla para continuar...

Parâmetros auto-calibrados para a iteração 7:

Subestação prioritária a ser recomposta: CGC

Subestação energizada mais próxima da prioritária: CGR

Número de passos para análise futura: 3

Número de soluções factíveis menor ou igual a 3. Todas serão avaliadas!

Área de recomposição em configuração normal? SIM

Elitismo: 100 %

Aleatoriedade: 0 %

Processando...

Resultado da iteração 7:

Solução trivial do passo 7: MIM_D34

Solução efetiva do passo 7 baseada na análise futura: MIM_D34

Função Objetivo: 2803.9216

Pressione qualquer tecla para continuar...

Parâmetros auto-calibrados para a iteração 8:

Subestação prioritária a ser recomposta: CGC
Subestação energizada mais próxima da prioritária: CGR
Número de passos para análise futura: 3

Número de soluções factíveis menor ou igual a 3. Todas serão avaliadas!

Área de recomposição em configuração normal? SIM
Elitismo: 100 %
Aleatoriedade: 0 %

Processando...

Resultado da iteração 8:
Solução trivial do passo 8: CGR_D38
Solução efetiva do passo 8 baseada na análise futura: CGR_D38
Função Objetivo: 4426.4706

Pressione qualquer tecla para continuar...

Parâmetros auto-calibrados para a iteração 9:

Subestação prioritária a ser recomposta: CGC
Subestação energizada mais próxima da prioritária: CGR
Número de passos para análise futura: 3

Número de soluções factíveis menor ou igual a 3. Todas serão avaliadas!

Área de recomposição em configuração normal? SIM
Elitismo: 100 %
Aleatoriedade: 0 %

Processando...

Resultado da iteração 9:
Solução trivial do passo 9: CGR_D02
Solução efetiva do passo 9 baseada na análise futura: CGR_D01
Função Objetivo: 844.1176

Pressione qualquer tecla para continuar...

Parâmetros auto-calibrados para a iteração 10:

Subestação prioritária a ser recomposta: CGC
Subestação energizada mais próxima da prioritária: CGR
Número de passos para análise futura: 3

Número de soluções factíveis menor ou igual a 3. Todas serão avaliadas!

Área de recomposição em configuração normal? SIM

Elitismo: 100 %

Aleatoriedade: 0 %

Processando...

Resultado da iteração 10:

Solução trivial do passo 10: CGB_D04

Solução efetiva do passo 10 baseada na análise futura: CGB_D04

Função Objetivo: 6150

Pressione qualquer tecla para continuar...

Parâmetros auto-calibrados para a iteração 11:

Subestação prioritária a ser recomposta: CGC

Subestação energizada mais próxima da prioritária: CGB

Número de passos para análise futura: 1

Número de soluções factíveis menor ou igual a 3. Todas serão avaliadas!

Área de recomposição em configuração normal? SIM

Elitismo: 100 %

Aleatoriedade: 0 %

Processando...

Resultado da iteração 11:

Solução trivial do passo 11: CGB_D05

Solução efetiva do passo 11 baseada na análise futura: CGB_D05

Função Objetivo: 2941.1765

Pressione qualquer tecla para continuar...

Parâmetros auto-calibrados para a iteração 12:

Subestação prioritária a ser recomposta: CGC

Subestação energizada mais próxima da prioritária: CGB

Número de passos para análise futura: 1

Número de soluções factíveis menor ou igual a 3. Todas serão avaliadas!

Área de recomposição em configuração normal? SIM

Elitismo: 100 %
Aleatoriedade: 0 %

Processando...

Resultado da iteração 12:

Solução trivial do passo 12: CGC_D10
Solução efetiva do passo 12 baseada na análise futura: CGC_D10
Função Objetivo: 9750

Pressione qualquer tecla para continuar...

Parâmetros auto-calibrados para a iteração 13:

Subestação prioritária a ser recomposta: CGM
Subestação energizada mais próxima da prioritária: CGR
Número de passos para análise futura: 1

Número de soluções factíveis menor ou igual a 3. Todas serão avaliadas!

Área de recomposição em configuração normal? SIM

Elitismo: 100 %
Aleatoriedade: 0 %

Processando...

Resultado da iteração 13:

Solução trivial do passo 13: CGR_D02
Solução efetiva do passo 13 baseada na análise futura: CGR_D02
Função Objetivo: 2775.4902

Pressione qualquer tecla para continuar...

Parâmetros auto-calibrados para a iteração 14:

Subestação prioritária a ser recomposta: CGM
Subestação energizada mais próxima da prioritária: CGR
Número de passos para análise futura: 1

Número de soluções factíveis menor ou igual a 3. Todas serão avaliadas!

Área de recomposição em configuração normal? SIM

Elitismo: 100 %
Aleatoriedade: 0 %

Processando...

Resultado da iteração 14:

Solução trivial do passo 14: CGM_D06

Solução efetiva do passo 14 baseada na análise futura: CGM_D06

Função Objetivo: 7617.6471

Pressione qualquer tecla para continuar...

Parâmetros auto-calibrados para a iteração 15:

Subestação prioritária a ser recomposta: DOD

Subestação energizada mais próxima da prioritária: CGR

Resultado da iteração 15:

Solução trivial do passo 15: JUP_D27

Solução efetiva do passo 15 baseada na análise futura: JUP_D27

Função Objetivo: 1941.1765

Pressione qualquer tecla para continuar...

Parâmetros auto-calibrados para a iteração 16:

Subestação prioritária a ser recomposta: DOD

Subestação energizada mais próxima da prioritária: CGR

Resultado da iteração 16:

Solução trivial do passo 16: MIM_D31

Solução efetiva do passo 16 baseada na análise futura: MIM_D31

Função Objetivo: 3602.9412

Pressione qualquer tecla para continuar...

Parâmetros auto-calibrados para a iteração 17:

Subestação prioritária a ser recomposta: DOD

Subestação energizada mais próxima da prioritária: CGR

Número de passos para análise futura: 3

Número de soluções factíveis menor ou igual a 3. Todas serão avaliadas!

Área de recomposição em configuração normal? SIM

Elitismo: 100 %

Aleatoriedade: 0 %

Processando...

Resultado da iteração 17:

Solução trivial do passo 17: MIM_D35
Solução efetiva do passo 17 baseada na análise futura: MIM_D35
Função Objetivo: 1833.3333

Pressione qualquer tecla para continuar...

Parâmetros auto-calibrados para a iteração 18:

Subestação prioritária a ser recomposta: DOD
Subestação energizada mais próxima da prioritária: CGR
Número de passos para análise futura: 3

Número de soluções factíveis menor ou igual a 3. Todas serão avaliadas!

Área de recomposição em configuração normal? SIM

Elitismo: 100 %

Aleatoriedade: 0 %

Processando...

Resultado da iteração 18:

Solução trivial do passo 18: CGR_D39
Solução efetiva do passo 18 baseada na análise futura: CGR_D39
Função Objetivo: 3397.0588

Pressione qualquer tecla para continuar...

Parâmetros auto-calibrados para a iteração 19:

Subestação prioritária a ser recomposta: DOD
Subestação energizada mais próxima da prioritária: CGR
Número de passos para análise futura: 3

Área de recomposição em configuração normal? SIM

Elitismo: 40 %

Aleatoriedade: 30 %

Processando...

Resultado da iteração 19:

Solução trivial do passo 19: CGR_D03
Solução efetiva do passo 19 baseada na análise futura: CGR_D41
Função Objetivo: 988.2353

Pressione qualquer tecla para continuar...

Parâmetros auto-calibrados para a iteração 20:

Subestação prioritária a ser recomposta: DOD
Subestação energizada mais próxima da prioritária: SIA
Número de passos para análise futura: 2

Área de recomposição em configuração normal? SIM
Elitismo: 40 %
Aleatoriedade: 30 %

Processando...

Resultado da iteração 20:
Solução trivial do passo 20: MAR_D45
Solução efetiva do passo 20 baseada na análise futura: MAR_D45
Função Objetivo: 4285.2941

Pressione qualquer tecla para continuar...

Parâmetros auto-calibrados para a iteração 21:

Subestação prioritária a ser recomposta: DOD
Subestação energizada mais próxima da prioritária: MAR
Número de passos para análise futura: 1

Área de recomposição em configuração normal? SIM
Elitismo: 40 %
Aleatoriedade: 30 %

Processando...

Resultado da iteração 21:
Solução trivial do passo 21: MAR_D46
Solução efetiva do passo 21 baseada na análise futura: MAR_D46
Função Objetivo: 2147.0588

Pressione qualquer tecla para continuar...

Parâmetros auto-calibrados para a iteração 22:

Subestação prioritária a ser recomposta: DOD

Subestação energizada mais próxima da prioritária: MAR
Número de passos para análise futura: 1

Área de recomposição em configuração normal? SIM
Elitismo: 40 %
Aleatoriedade: 30 %

Processando...

Resultado da iteração 22:
Solução trivial do passo 22: DOD_D47
Solução efetiva do passo 22 baseada na análise futura: DOD_D47
Função Objetivo: 5544.1176

Pressione qualquer tecla para continuar...

Parâmetros auto-calibrados para a iteração 23:

Subestação prioritária a ser recomposta: AQU
Subestação energizada mais próxima da prioritária: CGM
Número de passos para análise futura: 3

Número de soluções factíveis menor ou igual a 3. Todas serão avaliadas!

Área de recomposição em configuração normal? SIM
Elitismo: 100 %
Aleatoriedade: 0 %

Processando...

Resultado da iteração 23:
Solução trivial do passo 23: CGR_D03
Solução efetiva do passo 23 baseada na análise futura: CGR_D03
Função Objetivo: 1784.3137

Pressione qualquer tecla para continuar...

Parâmetros auto-calibrados para a iteração 24:

Subestação prioritária a ser recomposta: AQU
Subestação energizada mais próxima da prioritária: CGM
Número de passos para análise futura: 3

Número de soluções factíveis menor ou igual a 3. Todas serão avaliadas!

Área de recomposição em configuração normal? SIM

Elitismo: 100 %
Aleatoriedade: 0 %

Processando...

Resultado da iteração 24:

Solução trivial do passo 24: CGM_D07
Solução efetiva do passo 24 baseada na análise futura: CGM_D07
Função Objetivo: 4102.9412

Pressione qualquer tecla para continuar...

Parâmetros auto-calibrados para a iteração 25:

Subestação prioritária a ser recomposta: AQU
Subestação energizada mais próxima da prioritária: CGM
Número de passos para análise futura: 3

Número de soluções factíveis menor ou igual a 3. Todas serão avaliadas!

Área de recomposição em configuração normal? SIM

Elitismo: 100 %
Aleatoriedade: 0 %

Processando...

Resultado da iteração 25:

Solução trivial do passo 25: CGM_D09
Solução efetiva do passo 25 baseada na análise futura: CGM_D09
Função Objetivo: 1006.8627

Pressione qualquer tecla para continuar...

Parâmetros auto-calibrados para a iteração 26:

Subestação prioritária a ser recomposta: AQU
Subestação energizada mais próxima da prioritária: CGL
Número de passos para análise futura: 2

Número de soluções factíveis menor ou igual a 3. Todas serão avaliadas!

Área de recomposição em configuração normal? SIM

Elitismo: 100 %
Aleatoriedade: 0 %

Processando...

Resultado da iteração 26:

Solução trivial do passo 26: CGI_D24

Solução efetiva do passo 26 baseada na análise futura: CGI_D24

Função Objetivo: 4044.1176

Pressione qualquer tecla para continuar...

Parâmetros auto-calibrados para a iteração 27:

Subestação prioritária a ser recomposta: AQU

Subestação energizada mais próxima da prioritária: CGI

Número de passos para análise futura: 1

Área de recomposição em configuração normal? PARCIAL

Elitismo: 30 %

Aleatoriedade: 40 %

Processando...

Resultado da iteração 27:

Solução trivial do passo 27: CGI_D48

Solução efetiva do passo 27 baseada na análise futura: CGI_D48

Função Objetivo: 1694.1176

Pressione qualquer tecla para continuar...

Parâmetros auto-calibrados para a iteração 28:

Subestação prioritária a ser recomposta: AQU

Subestação energizada mais próxima da prioritária: CGI

Número de passos para análise futura: 1

Área de recomposição em configuração normal? PARCIAL

Elitismo: 30 %

Aleatoriedade: 40 %

Processando...

Resultado da iteração 28:

Solução trivial do passo 28: AQU_D50

Solução efetiva do passo 28 baseada na análise futura: AQU_D50

Função Objetivo: 4058.8235

Pressione qualquer tecla para continuar...

Parâmetros auto-calibrados para a iteração 29:

Subestação prioritária a ser recomposta: CGA
Subestação energizada mais próxima da prioritária: CGI
Número de passos para análise futura: 1

Área de recomposição em configuração normal? PARCIAL
Elitismo: 30 %
Aleatoriedade: 40 %

Processando...

Resultado da iteração 29:

Solução trivial do passo 29: CGI_D23
Solução efetiva do passo 29 baseada na análise futura: CGI_D23
Função Objetivo: 1520.5882

Pressione qualquer tecla para continuar...

Parâmetros auto-calibrados para a iteração 30:

Subestação prioritária a ser recomposta: CGA
Subestação energizada mais próxima da prioritária: CGI
Número de passos para análise futura: 1

Área de recomposição em configuração normal? PARCIAL
Elitismo: 30 %
Aleatoriedade: 40 %

Processando...

Resultado da iteração 30:

Solução trivial do passo 30: CGA_D18
Solução efetiva do passo 30 baseada na análise futura: CGA_D18
Função Objetivo: 3273.5294

Pressione qualquer tecla para continuar...

Parâmetros auto-calibrados para a iteração 31:

Subestação prioritária a ser recomposta: CGS
Subestação energizada mais próxima da prioritária: CGM
Número de passos para análise futura: 1

Área de recomposição em configuração normal? PARCIAL

Elitismo: 30 %

Aleatoriedade: 40 %

Processando...

Resultado da iteração 31:

Solução trivial do passo 31: CGM_D08

Solução efetiva do passo 31 baseada na análise futura: CGM_D08

Função Objetivo: 1372.549

Pressione qualquer tecla para continuar...

Parâmetros auto-calibrados para a iteração 32:

Subestação prioritária a ser recomposta: CGS

Subestação energizada mais próxima da prioritária: CGM

Número de passos para análise futura: 1

Área de recomposição em configuração normal? PARCIAL

Elitismo: 30 %

Aleatoriedade: 40 %

Processando...

Resultado da iteração 32:

Solução trivial do passo 32: CGS_D12

Solução efetiva do passo 32 baseada na análise futura: CGS_D12

Função Objetivo: 2794.1176

Pressione qualquer tecla para continuar...

Parâmetros auto-calibrados para a iteração 33:

Subestação prioritária a ser recomposta: CGJ

Subestação energizada mais próxima da prioritária: CGC

Número de passos para análise futura: 1

Área de recomposição em configuração normal? PARCIAL

Elitismo: 30 %

Aleatoriedade: 40 %

Processando...

Resultado da iteração 33:

Solução trivial do passo 33: CGC_D11

Solução efetiva do passo 33 baseada na análise futura: CGC_D11
Função Objetivo: 1217.6471

Pressione qualquer tecla para continuar...

Parâmetros auto-calibrados para a iteração 34:

Subestação prioritária a ser recomposta: CGJ
Subestação energizada mais próxima da prioritária: CGC
Número de passos para análise futura: 1

Área de recomposição em configuração normal? PARCIAL
Elitismo: 30 %
Aleatoriedade: 40 %

Processando...

Resultado da iteração 34:
Solução trivial do passo 34: CGJ_D14
Solução efetiva do passo 34 baseada na análise futura: CGJ_D14
Função Objetivo: 2150

Pressione qualquer tecla para continuar...

Parâmetros auto-calibrados para a iteração 35:

Subestação prioritária a ser recomposta: CGD
Subestação energizada mais próxima da prioritária: CGJ
Número de passos para análise futura: 1

Área de recomposição em configuração normal? PARCIAL
Elitismo: 30 %
Aleatoriedade: 40 %

Processando...

Resultado da iteração 35:
Solução trivial do passo 35: CGI_D21
Solução efetiva do passo 35 baseada na análise futura: CGI_D21
Função Objetivo: 1074.5098

Pressione qualquer tecla para continuar...

Parâmetros auto-calibrados para a iteração 36:

Subestação prioritária a ser recomposta: CGD
Subestação energizada mais próxima da prioritária: CGJ
Número de passos para análise futura: 1

Área de recomposição em configuração normal? PARCIAL
Elitismo: 30 %
Aleatoriedade: 40 %

Processando...

Resultado da iteração 36:
Solução trivial do passo 36: CGD_D20
Solução efetiva do passo 36 baseada na análise futura: CGD_D20
Função Objetivo: 1852.9412

Pressione qualquer tecla para continuar...

Parâmetros auto-calibrados para a iteração 37:

Subestação prioritária a ser recomposta: SGO
Subestação energizada mais próxima da prioritária: CGR

Subestação prioritária vizinha à energizada. Não há necessidade de análise de passos futuros!

Resultado da iteração 37:
Solução trivial do passo 37: CGR_D42
Solução efetiva do passo 37 baseada na análise futura: CGR_D42
Função Objetivo: 1132.3529

Pressione qualquer tecla para continuar...

Parâmetros auto-calibrados para a iteração 38:

Subestação prioritária a ser recomposta: RVE
Subestação energizada mais próxima da prioritária: SGO

Subestação prioritária vizinha à energizada. Não há necessidade de análise de passos futuros!

Resultado da iteração 38:
Solução trivial do passo 38: SGO_D53
Solução efetiva do passo 38 baseada na análise futura: SGO_D53
Função Objetivo: 962.2549

Pressione qualquer tecla para continuar...

Parâmetros auto-calibrados para a iteração 39:

Subestação prioritária a ser recomposta: COX

Subestação energizada mais próxima da prioritária: RVE

Subestação prioritária vizinha à energizada. Não há necessidade de análise de passos futuros!

Resultado da iteração 39:

Solução trivial do passo 39: RVE_D55

Solução efetiva do passo 39 baseada na análise futura: RVE_D55

Função Objetivo: 847.0588

Pressione qualquer tecla para continuar...

Parâmetros auto-calibrados para a iteração 40:

Todas as Subestações foram energizadas. Não há necessidade de análise de passos futuros!

Resultado da iteração 40:

Solução trivial do passo 40: JUP_D28

Solução efetiva do passo 40 baseada na análise futura: JUP_D28

Função Objetivo: 323.5294

Pressione qualquer tecla para continuar...

Resultado da iteração 41:

Solução trivial do passo 41: MIM_D32

Solução efetiva do passo 41 baseada na análise futura: MIM_D32

Função Objetivo: 1029.4118

Pressione qualquer tecla para continuar...

Resultado da iteração 42:

Solução trivial do passo 42: MIM_D36

Solução efetiva do passo 42 baseada na análise futura: MIM_D36

Função Objetivo: 264.7059

Pressione qualquer tecla para continuar...

Resultado da iteração 43:

Solução trivial do passo 43: CGR_D40

Solução efetiva do passo 43 baseada na análise futura: CGR_D40

Função Objetivo: 823.5294

Pressione qualquer tecla para continuar...

Resultado da iteração 44:

Solução trivial do passo 44: CGD_D19

Solução efetiva do passo 44 baseada na análise futura: CGD_D19

Função Objetivo: 102.9412

Pressione qualquer tecla para continuar...

Resultado da iteração 45:

Solução trivial do passo 45: CGJ_D15

Solução efetiva do passo 45 baseada na análise futura: CGJ_D15

Função Objetivo: 617.6471

Pressione qualquer tecla para continuar...

Resultado da iteração 46:

Solução trivial do passo 46: CGI_D22

Solução efetiva do passo 46 baseada na análise futura: CGI_D22

Função Objetivo: 73.5294

Pressione qualquer tecla para continuar...

Resultado da iteração 47:

Solução trivial do passo 47: CGJ_D16

Solução efetiva do passo 47 baseada na análise futura: CGJ_D16

Função Objetivo: 411.7647

Pressione qualquer tecla para continuar...

Resultado da iteração 48:

Solução trivial do passo 48: CGI_D49

Solução efetiva do passo 48 baseada na análise futura: CGI_D49

Função Objetivo: 44.1176

Pressione qualquer tecla para continuar...

Resultado da iteração 49:

Solução trivial do passo 49: AQU_D51

Solução efetiva do passo 49 baseada na análise futura: AQU_D51

Função Objetivo: 205.8824

Pressione qualquer tecla para continuar...

Resultado da iteração 50:

Solução trivial do passo 50: CGA_D17

Solução efetiva do passo 50 baseada na análise futura: CGA_D17

Função Objetivo: 0.4902

Pressione qualquer tecla para continuar...

Resultado da iteração 51:

Solução trivial do passo 51: CGS_D13

Solução efetiva do passo 51 baseada na análise futura: CGS_D13

Função Objetivo: 0

Pressione qualquer tecla para continuar...

***** Resultado Final: *****

Sequência final de fechamento dos Disjuntores:

JUP_D25

MIM_D29

JUP_D26

MIM_D30

MIM_D33

CGR_D37

MIM_D34

CGR_D38

CGR_D01

CGB_D04

CGB_D05

CGC_D10

CGR_D02

CGM_D06

JUP_D27

MIM_D31

MIM_D35
CGR_D39
CGR_D41
MAR_D45
MAR_D46
DOD_D47
CGR_D03
CGM_D07
CGM_D09
CGI_D24
CGI_D48
AQU_D50
CGI_D23
CGA_D18
CGM_D08
CGS_D12
CGC_D11
CGJ_D14
CGI_D21
CGD_D20
CGR_D42
SGO_D53
RVE_D55
JUP_D28
MIM_D32
MIM_D36
CGR_D40
CGD_D19
CGJ_D15
CGI_D22
CGJ_D16
CGI_D49
AQU_D51
CGA_D17
CGS_D13

Parâmetros de análise dos resultados:

1) Fator Prioridade - Expressa a relação de velocidade com que a busca atinge sua prioridade:
Fator Prioridade = 76.4706 %

2) Fator Ganho - Expressa a relação de ganho da busca na sua primeira metade:
Fator Ganho = 78.1965 %

3) Função Objetivo - Valor total acumulado:
Função Objetivo = 12.7723 x 10⁴

4) Tempo Computacional - Tempo total gasto no processo de busca:
Tempo Computacional = 11.058 segundos

7 - Referências Bibliográficas

- [1] Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL – *Resolução Normativa nº 024* de 27 de Janeiro de 2000.
- [2] Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL – *Resolução Normativa nº 505* de 27 de Setembro de 2001.
- [3] Silva, L. G. W.; Pereira, R. A. F.; Mantovani, J. R. S. *Alocação e Realocação de Chaves para Restauração de Redes de Distribuição Utilizando Algoritmo de Busca Tabu Dedicado*. XV CBA – Congresso Brasileiro de Automática, 2004, Gramado – RS.
- [4] Mori, H.; Ogita, Y. *A Parallel Tabu Search Based Approach to Optimal Network Reconfigurations for Service Restoration in Distribution Systems*. IEEE International Conference on Control Applications, 2002, Glasgow, Scotland, UK.
- [5] Toune, S.; Fudo, H.; Genji, T. *et al.* *A Reactive Tabu Search for Service Restoration in Electric Power Distribution Systems*. IEEE International Conference on Evolutionary Computation, Anchorage, Alaska, 1998.
- [6] Wang, H.; Liu, Y. *Hierarchical case-based decision support system for power system restoration*. Power Engineering Society General Meeting, IEEE, Vol.1, p.:1115-1119, 2004.
- [7] Bretas, A.S.; Phadke, A.G. *Artificial neural networks in power system restoration*. IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 18, Nº 4, p.:1181–1186, 2003.
- [8] ONS (2004). *Procedimentos de Rede, Módulo 10, Submódulo 10.21 – Instruções de Operação e Mensagens Operativas*. http://www.ons.org.br/procedimentos/modulo_10.aspx
- [9] Glover, F. *Tabu Search: A Tutorial*, University of Colorado, Boulder, Colorado, 1990.
- [10] Sexton, R.S.; Alidaee, B.; Dorsey, R. E. *et al.* *D. Global optimization for artificial neural networks: A tabu search application*. European Journal of Operational Research, Vol. 106, Nº 2, p.: 570-584, 1998.

- [11] Pureza, V.; Morabito, R. *Uma heurística de busca tabu simples para o problema de carregamento de paletes do produtor*. Pesquisa Operacional, Vol. 23, Nº 2, 2003.
- [12] Silva, L. G. W. *Desenvolvimento de uma Metodologia Integrada para Alocação Otimizada de Dispositivos de Controle e Proteção em Sistemas Elétricos de Distribuição de Energia Elétrica*. Ilha Solteira, 2005. Dissertação (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista – UNESP.
- [13] Souza, M. J. F. *Notas de Aula da Disciplina Inteligência Computacional para Otimização*. Departamento de Computação, Instituto de Ciências Exatas e Biológicas, Universidade Federal de Ouro Preto, 2005, p.: 14-18.
- [14] Battiti, R.; Tecchiolli, G. *The Reactive Tabu Search*, ORSA Journal on Computing, 6 (2): p.: 126-140, 1994.
- [15] Sorlin, S.; Solnon, C. *Reactive Tabu Search for Measuring Graph Similarity*. Lecture Notes in Computer Science, Vol. 3434/2005, p.: 172-182, 2005.
- [16] Kincaid, R. K.; Laba, K. E. *Reactive Tabu Search and Sensor Selection in Active Structural Acoustic Control Problems*. Journal of Heuristics, Vol. 4, Nº 3, p.: 199-220, 1998.
- [17] Osman, I. H.; Wassan, N. A. *A reactive tabu search meta-heuristic for the vehicle routing problem with back-hauls*. Journal of Scheduling, Vol. 5, Nº 4, p.: 263–285, 2002.
- [18] Aho, A. V.; Hopcroft, J. E.; Ullman, J. D. *Data Structures and Algorithms*, 1985, Addison-Wesley.
- [19] http://pt.wikibooks.org/wiki/Estrutura_de_Dados_II/Tabela_de_Hash
- [20] Goldberg, D. E. *Genetic Algorithms in Search, Optimization & Machine Learning*, 1989, Addison Wesley.
- [21] Pinto, J. O. P. *Notas de Aula da Disciplina Tópicos Avançados em Inteligência Computacional e Aplicações*. Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, 2004.
- [22] Carvalho, A. P. de L. F. *Algoritmos Genéticos*. Departamento de Ciências da Computação, Universidade de São Paulo. <http://www.icmc.sc.usp.br/~andre/research/genetic/index.htm>

- [23] Santini Jr., L. C. *Utilização de Algoritmo Genético na recomposição de sistemas elétricos de potência*, VI Congress of Logic Applied to Technology - LAPTEC, 2007.
- [24] Corrêa, R. C.; Ferreira, A.; Rebreyend, P. *Scheduling Multiprocessor Tasks with Genetic Algorithms*. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, Vol. 10, Nº. 8, p.: 825-837, 1999.
- [25] Carvalho, M. A. M.; Santos, A. G.; Mateus, G. R. *Algoritmo Genético aplicado ao Problema Set Covering multiobjetivo: uma etapa do Problema de Escalonamento de Tripulações*. XXV Congresso da Sociedade Brasileira de Computação, 2005, São Leopoldo – RS.
- [26] Dantzig, G. B.; Ramser, J. H. *The Truck Dispatching Problem*. Management Science, Vol. 6, Nº. 1, p.: 80-91, 1959.
- [27] Dorigo, M.; Gambardella, L. M. *Ant Colonies for the Traveling Salesman Problem*. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol. 1, Nº. 1, p.: 53-66, 1997.

Bibliografia Adicional:

- [28] Gonçalves, A. M. M.; Pinto, J. O. P.; Leite, L. C. *et al.* Sistema Especialista para Treinamento e Simulação da Recomposição do Sistema Elétrico ENERSUL. IX EDAO – Encontro para Debates de Assuntos de Operação, 2007, Rio Quente – GO.
- [29] Gonçalves, A. M. M.; Pinto, J. O. P.; Leite, L. C. Methodology for Service Restoration based Adaptive-Selective Tabu Search - ASTS. 7th ISDA - International Conference on Intelligent Systems Design and Applications, Rio de Janeiro, 2007.
- [30] Adibi, M. M. *Power System Restoration – Methodologies & Implementation Strategies*. IEEE Series on Power Engineering, P. M. Anderson, Series Editor, IEEE Press, ISBN 0-7803-5397-8, 2000.
- [31] Mota, L. T. M.; Mota, A. de A.; França, A. L. M. *Physically-based aggregation of object-oriented load models in power systems restoration*. Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, IEEE/PES, p.:155–160, 8-11 Nov 2004.

- [32] Hsu, Y. Y.; Huang, H. M. *Distribution System Service Restoration using the Artificial Neural Network Approach and Pattern Recognition Method*. IEEE Proceeding in Generation, Transmission and Distribution, Vol. 142, N° 3, May 1995.
- [33] Pahwa, A. *Role of Distribution Automation in Restoration of Distribution Systems after Emergencies*. Power Engineering Society Summer Meeting 2001, IEEE, Vol. 1, p.: 15-19, July 2001.
- [34] Ignízio, James P. *Introduction to Expert Systems – The Development and Implementation of Rule-based Expert Systems*. McGraw-Hill, Inc. 1991.
- [35] Mota, L. T. M.; Mota, A. de A.; França, A. L. M. *Physically-based aggregation of object-oriented load models in power systems restoration*. Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, IEEE/PES, p.:155–160, 8-11 Nov. 2004.
- [36] Morelato, A.; Monticelli, A. *Heuristic Search Approach to Distribution System Restoration*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, N° 4, p. 2235-2241, 1989.
- [37] Huang, C. *Multiobjective service restoration of distribution systems using fuzzy cause-effect networks*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 18, N° 2, 2003.
- [38] Gomes, P.; de Lima, A. C. S.; de Padua Guarini, A. *Guidelines for power system restoration in the Brazilian system*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 19, N° 2, p.:1159–1164, 2004.
- [39] Matsumoto, K.; Sakaguchi, T.; Kafka, R. J. *et al. Knowledge-based systems as operational aids in power system restoration*. Proceedings of the IEEE, Vol. 80, N° 5, p.: 689–697, 1992.
- [40] Sakaguchi, T.; Matsumoto, K. *Development of a knowledge-based system for power system restoration*. Proceedings IEEE Transactions Power App. System., Vol. PAS-102, p.: 320-329, Feb. 1983.
- [41] Hotta, K.; Nomura, H.; Takemoto, H. *et al. Implementation of a real-time expert system for a restoration guide in a dispatching center*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 5, N° 3, p.:1032–1038, Aug. 1990.
- [42] Delbem, A. C. B.; Bretas, N. G.; Carvalho, A. *Algoritmo de Busca com Heurísticas Fuzzy para Restabelecimento de Energia em sistemas Radiais*

- de Distribuição*. Revista Controle & Automação, SBA, Vol. 11, Nº 1, p.: 55-60, 2000.
- [43] Santos, J. V. C. dos; Garcia, A. V. *Um Método para Auxiliar Restaurações em Sistemas de Potência*. Revista Controle & Automação, SBA, Vol. 15, Nº 1, p.: 85-92, 2004.
- [44] Toledo, S. P.; de Souza, C. de R.; Lambert-Torres, G. *Sistema Especialista para Auxílio ao Operador de Subestações de Distribuição*. Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico, Itajubá - Brasil, Vol. 22, Nº 2, p. 105-112, 1998.
- [45] Guirelli, C. R. *Sistema Especialista para Apoio a Recomposição do Sistema CTEEP*. IX EDAO – Encontro para Debates de Assuntos de Operação, 2007, Rio Quente – GO.
- [46] Araújo, A. S. *Sistema Especialista de Apoio à Operação e Recomposição do Sistema Elétrico*. IX EDAO – Encontro para Debates de Assuntos de Operação, 2007, Rio Quente – GO.
- [47] Vale, M. H. M.; Lobato, M. V. C.; Lameiras, M. S. *et al. SAR – Sistema Especialista de Apoio ao Restabelecimento*. XIV SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 1997, Belém – PA.
- [48] Martino, M. B.; da Silva, M. B.; Lourenço, C. R. *et al. Sistema Especialista de Auxílio à Recomposição do Sistema Furnas*. XV SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Outubro de 1999, Foz do Iguaçu – PR.
- [49] Sator Filho, A.; Rolim, J. G.; Andrade, M. S. *Sistema Especialista para Auxílio à Recomposição de Subestações de Transmissão na Fase Fluente*. XVII SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Outubro de 2003, Uberlândia – MG.
- [50] *MATLAB: The Language of technical Computing*. Copyright 1984-2004 The Mathworks, Inc. <http://www.mathworks.com>