

**SEQUENCIAMENTO ÓTIMO DA RECOMPOSIÇÃO
DE SISTEMAS ELÉTRICOS UTILIZANDO
ALGORITMOS GENÉTICOS**

LUIZ CARLOS SANTINI JUNIOR

CAMPO GRANDE

2008

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

SEQUENCIAMENTO ÓTIMO DA RECOMPOSIÇÃO
DE SISTEMAS ELÉTRICOS UTILIZANDO
ALGORITMOS GENÉTICOS

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

LUIZ CARLOS SANTINI JUNIOR

Campo Grande, Maio de 2008

*Ao grande Deus que sempre esteve ao meu lado nessa caminhada.
A minha família, a Bia e o pequeno Pedro, pelo amor, dedicação e apoio*

AGRADECIMENTOS

Aos professores João Onofre Pereira Pinto Ph.D e Germano Lambert Torres Ph.D, meu orientador e co-orientador respectivamente pelo conhecimento sobre o assunto, apoio dispensado, pelas contribuições e paciência, que foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

As Professoras Dra. Luciana Cambraia Leite e Dra Kathya Collazos Linares, pelas valiosas contribuições na etapa de Qualificação desta Dissertação de Mestrado.

A empresa Energética de Mato Grosso do Sul - ENERSUL por acreditar e suportar meu trabalho.

A equipe do Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento do Sistema Especialista para Auxílio na Tomada de Decisões na Operação em Tempo Real, em especial o colega de mestrado e trabalho Antônio Maurício de Matos Gonçalves.

Aos professores e funcionários do mestrado e do Departamento de Engenharia Elétrica – DEL – UFMS por seu auxílio.

A equipe de pesquisadores do Batlab (Laboratório de Inteligência Artificial, Eletrônica de Potência e Eletrônica Digital), especialmente ao Mestre Luigi Galotto Junior pelo suporte, ajuda nas técnicas computacionais relacionadas ao Algoritmo Genético e sugestões.

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

SEQUENCIAMENTO ÓTIMO DA RECOMPOSIÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS UTILIZANDO ALGORITMOS GENÉTICOS

Luiz Carlos Santini Junior

Abril/2008

Orientador: João Onofre Pereira Pinto, PhD

Co-orientador: Germano Lambert Torres, PhD

Área de Concentração: Inteligência Artificial, teoria e aplicações

Palavras-chave: Inteligência Artificial, Algoritmos Genéticos, Recomposição de Sistemas, Operação de Sistemas Elétricos de Potência

Número de Páginas: 103.

RESUMO: O presente trabalho aborda o desenvolvimento de um algoritmo computacional, baseado na técnica evolutiva de otimização de Algoritmo Genético, com o objetivo de encontrar a melhor seqüência de recomposição de linhas de subtransmissão, baseado em um índice de prioridade de energização das barras e instruções de operação. No trabalho é apresentada uma breve descrição sobre operação, automação e recomposição de sistemas elétricos, são descritas literaturas pertinente ao assunto recomposição e técnicas computacionais aplicadas a ela. O algoritmo computacional desenvolvido é composto de um módulo denominado “GA”, onde é feita a seleção pelo método da roleta, análise da condição de término pela quantidade de gerações máximas e aplicação dos operadores genéticos de cruzamento e mutação; e um módulo denominado “fcusto”, responsável pela pontuação das soluções encontradas em relação a uma função objetivo, ou função custo. A função objetivo avalia uma nota referente ao índice de prioridade das cargas, e uma nota referente as regras de sentido obrigatório de energização das linhas. Para validação do algoritmo foram realizadas simulações computacionais em três configurações do sistema elétrico, sendo duas configuração referentes ao sistema de 138kV da rede de subtransmissão que atende ao estado de Mato Grosso do Sul. Foi executada a busca exaustiva em todos os casos para fins de comparação. Os resultados do algoritmo foram obtidos com sucesso, após uma sintonia dos parâmetros utilizados, e em um tempo computacional e espaço de busca inferior ao da busca exaustiva.

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

BEST RESTORATION SEQUENCE OF POWER SYSTEMS USING EVOLUTIVE TECHNIQUE OF GENETIC ALGORITHM

Luiz Carlos Santini Junior

April/2008

Advisor: João Onofre Pereira Pinto, PhD

Co-advisor: Germano Lambert Torres, PhD

Area of Concentration: Artificial Intelligence, theory and application

Keywords: Artificial Intelligence, Genetic Algorithm, Power System Restoration, Power Systems Operation.

Number of Pages: 103.

ABSTRACT: This thesis is about the development of a computer algorithm, based on the Genetic Algorithm optimization evolutive technique, with the objective of finding the best restoration sequence of transmission power lines, based in the buses priority and operation instructions. In this thesis is written in the introduction a brief description of the power system operation, automation and restoration, it is described several papers about the restoration issue and computer techniques applied to them. The computer algorithm developed is composed of a module called "GA", where is made the selection by the roulette method, analysis of the algorithm stop condition using the maximum generation and it is applied the genetic operators of crossover and mutation, also there is o module called "fcusto", responsible for the punctuation of the encountered solutions related to a objective function, or cost function. The objective function evaluated a specific note referred to the load priorities, and a note referred to the rules of the compulsory line flow direction. To algorithm testing were realized several computation simulation in three power system configuration, being two related to a 138kV sub-transmission system that attend to the Mato Grosso do Sul state. It was applied; in the first place, the exhaustive search in all the cases as comparison benchmark. The algorithm results were obtained with success, after parameter tuning, in a computer time and search space dimension smaller than the exhaustive search.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABELAS	iii
LISTA DE SÍMBOLOS	iv
Capítulo 1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 Introdução	1
1.2 Organização do Setor Elétrico brasileiro	1
1.3 Operação de Sistemas Elétricos	3
1.3.1 Recursos utilizados na operação	10
1.3.2 Procedimentos e documentações operacionais	10
1.3.3 Sistemas de Supervisão e Controle	11
1.4 Recomposição de Sistemas Elétricos	17
1.4.1 Blecautes	17
1.4.2 Filosofia de recomposição	18
1.4.3 Técnicas de recomposição assistida por sistema computacional	19
1.5 Necessidade de uma ferramenta computacional de auxílio a recomposição	21
1.6 Objetivo da dissertação	22
1.7 Estrutura da dissertação	23
Capítulo 2 – TÉCNICAS COMPUTACIONAIS DE AUXILIO A OPERAÇÃO E RECOMPOSIÇÃO DE SISTEMAS	24
2.1 Introdução	24
2.2 Revisão bibliográfica sobre o tema	24
Capítulo 3 - ALGORITMOS GENÉTICOS (AG)	32
3.1 Introdução	32
3.2 Descrição do AG	33
3.3 Histórico do AG	35
3.4 Definições básicas	35

3.4.1	Codificação	36
3.4.2	Função de avaliação (função <i>fitness</i>) ou objetivo	38
3.4.3	Seleção	38
3.4.4	Operadores Genéticos	38
3.4.5	Condição de parada	41
3.4.6	Parâmetros dos operadores genéticos	41
3.4.7	Critérios de seleção	42
3.5	Outros tipos de AG	46
3.5.1	Genitor	46
3.5.2	CHC – Cruzamento a partir da seleção elitista, recombinação heterogênea e mutação cataclísmica	46
3.5.3	Algoritmos híbridos	46
Capítulo 4 – CODIFICAÇÃO DO PROBLEMA DE RECOMPOSIÇÃO DE SISTEMAS UTILIZANDO AG		48
4.1	Introdução	48
4.2	Descrição geral	49
4.3	Codificação do problema	51
4.3.1	População inicial	53
4.3.2	Função objetivo	53
4.3.3	Funcionamento dos operadores genéticos	58
4.4	Interface gráfica utilizada	59
Capítulo 5 - RESULTADOS OBTIDOS		62
5.1	Introdução	62
5.2	Resultado dos testes	63
5.2.1	Estudo de caso 1 – Exemplo 4 barras	63
5.2.2	Estudo de caso 2 – região de Campo Grande	64
5.2.3	Estudo de caso 3 – circuitos de Jupia/Corumbá	68
5.3	Considerações finais	71
Capítulo 6 - CONCLUSÕES		73
6.1	Conclusões	73
6.2	Propostas para trabalhos futuros	75
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		76
Anexo A: Código Matlab AG e BE		1
Anexo B: Exemplo resultados obtidos no Matlab		15

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Diagrama do SIN [2]	5
Figura 1.2 – Representação da curva de carga ao longo de um dia em um Sistema Elétrico [3]	6
Figura 1.3 – Atuação do ONS sobre o SIN [2]	7
Figura 1.4 – Diagrama de interrogação entre o SCADA e a UTR	11
Figura 1.5 – Diagrama de um SCADA mais simples com configuração comunicação serial	12
Figura 1.6 – Diagrama típico de uma UTR	13
Figura 1.7 – Diagrama típico de uma subestação telecontrolada através de IED's modernas	14
Figura 1.8 – Diagrama de um sistema SCADA moderno	16
Figura 2.1 – Conceito básico para método de recomposição conforme Método Guiado ao Longo do Tempo [30]	25
Figura 2.2 – Estrutura do sistema proposto de integração de SE com AG [38]	29
Figura 3.1 – Fluxograma Básico de um AG	36
Figura 3.2 - Representação do Cromossomo	37
Figura 3.3 – Comparativo entre os diferentes conceitos	37
Figura 3.4a – Cruzamento de uma partição	39
Figura 3.4b – Cruzamento de duas partições	39
Figura 3.4c – Cruzamento de três partições	39
Figura 3.5a – Operador genético mutação	40
Figura 3.5b – Operador genético hipermutação	40
Figura 3.5c – Esquema da mutação por inversão	40
Figura 3.5d – Esquema da mutação por translação	41
Figura 3.6a – Gráfico critério da roleta simples	44
Figura 3.6b – Gráfico critério do ranking	45
Figura 3.7 – Exemplificação do método da roleta simples	45
Figura 4.1 – Diagrama de blocos do aplicativo desenvolvido	50
Figura 4.2 – Exemplo	52

Figura 4.3 – Matriz de indivíduos exemplo	53
Figura 4.4 – Vetor resultado do exemplo	54
Figura 4.5 – Evolução do AG, caso exemplo	54
Figura 4.6 – <i>Fitness scaling</i> utilizado, Equação (4.1)	55
Figura 4.7 – Exemplo limitação das restrições para as 2 primeiras linhas do cromossomo	57
Figura 4.8 – Tela gráfica de entrada de dados programa EXPERT	60
Figura 4.9 – Continuação das telas gráficas de entrada de dados programa EXPERT	60
Figura 4.10 – Telas gráficas aplicativo RECOMPOR	61
Figura 5.1 - Diagrama unifilar exemplo 1	64
Figura 5.2 - Diagrama unifilar simplificado da região de Campo Grande – estudo de caso 2	65
Figura 5.3 - Diagrama unifilar simplificado da região de Campo Grande – estudo de caso 2, nova prioridade	66
Figura 5.4 – caso 2, energização parcial região de Campo Grande	67
Figura 5.5 - Diagrama unifilar simplificado da região entre a usina de Jupia e Corumbá, parcialmente energizado	69
Figura 5.6 - Diagrama unifilar simplificado da região entre a usina de Jupia e Corumbá, parcialmente energizado via 230 kV	70
Figura B.1 – Tela módulo RECOMPOR, busca exaustiva parcial – Região de Campo Grande	16
Figura B.2 – Tela módulo RECOMPOR, busca AG total – Região de Campo Grande	17
Figura B.3 – Tela módulo RECOMPOR, busca exaustiva parcial – Região de Jupia até Corumbá	18
Figura B.4 – Tela módulo RECOMPOR, busca AG total – Região de Jupia até Corumbá	19
Figura B.5 – Exemplo resultado fitness no número máximo de gerações	22
Figura B.6 – Gráfico da geração elite	23

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Resumo comparativo entre terminologias	37
Tabela 3.2 – Dados exemplo para a técnica da roleta	43
Tabela 3.3 – Dados exemplo para a técnica de ranking	44
Tabela 4.1 – Parâmetros da matriz de entrada de dados Kb	49
Tabela 4.2 – Prioridades do exemplo demonstrado na Figura 4.2	52
Tabela 5.1 – Resultado caso 1 - exemplo	64
Tabela 5.2 – Resultado caso 2 – região de Campo Grande	65
Tabela 5.3 – Índice de prioridade de recomposição adotado no estudo de caso 2	66
Tabela 5.4 – Resultado caso 2 – região de Campo Grande – nova prioridade	67
Tabela 5.5 – Resultado caso 2 – região de Campo Grande – recomposição parcial	68
Tabela 5.6 – Resultado caso estudo 3 – região de Jupia/Corumbá – recomposição parcial	69
Tabela 5.7 – Resultado caso estudo 3 –recomposição parcial via 230kV	71

LISTA DE SIMBOLOS

AG: Algoritmo Genético.

ANEEL: Agência Nacional de Energia Elétrica.

CNOS: Centro Nacional de Operação do Sistema.

COD: Centro de Operação da Distribuição.

COS: Centro de Operação do Sistema.

CRO: Centro Regional de Operação.

DMS: Sistemas de gestão de distribuição de energia.

EMS: Sistemas de gestão de transmissão de energia.

GA: Algoritmo Genético (Genetic Algorithm).

GPS: Sistema de posicionamento global, utilizado também para acertar relógios a um referencial comum.

GUI: Interface gráfica do usuário.

IA: Inteligência Artificial.

IED: Dispositivo eletrônico inteligente.

IHM: Interface homem-máquina.

IO: Instrução de operação.

NA: Normalmente aberta.

NF: Normalmente fechada.

ONS: Operador Nacional do Sistema.

SCADA: Sistema de aquisição de dados, supervisão e controle.

SE: Sistema Especialista.

SIN: Sistema Interligado Nacional.

SOE: Seqüenciamento real de eventos.

SSC: Sistemas de Supervisão e Controle.

TCP/IP: Protocolo de internet, protocolo de controle de transferência de dados.

UTR: Unidade Terminal Remota.

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 Introdução

Este capítulo tem como objetivo introduzir o tema operação e controle de sistemas elétricos. Inicialmente é feita uma breve descrição sobre a organização do setor elétrico brasileiro, em seguida discute-se a operação no Brasil e os sistemas de supervisão e controle. Ao final do capítulo é mostrado um dos maiores problemas relacionados às emergências na operação, que são os blecautes e as técnicas de recomposição utilizadas, tanto no nível de procedimento, como a nível computacional. Finalmente, é apresentada a ordem em que estão organizados os capítulos deste trabalho, e um breve resumo dos mesmos.

1.2 Organização do Setor Elétrico brasileiro

A liberalização econômica brasileira, iniciada na década de 1990, aliada a uma reforma das instituições e ajuste econômico culminou com um novo desenho do setor elétrico. Sob a justificativa da crise institucional e econômica do Estado brasileiro, e com base em argumentos tais como ampliação do atendimento com maior qualidade e menores tarifas, idealizou-se uma profunda e radical quebra de paradigma setorial [1], com a adoção de um modelo baseado em: desverticalização da indústria, distinguindo-se segmentos monopolistas (regulados): transmissão e distribuição; e não monopolistas: geração e comercialização. Com privatizações e instituição de um modelo comercial baseado em comportamento competitivo dos agentes setoriais, mantendo a regulação técnica e econômica independente das atividades do setor.

A estrutura do setor elétrico é apresentada brevemente a seguir [2]:

- CNPE - Conselho Nacional de Política Energética. Órgão de assessoramento do Presidente da República para formulação de políticas nacionais e diretrizes de energia, visando, dentre outros, o aproveitamento natural dos recursos energéticos

do país, rever periodicamente a matriz energética e estabelecer diretrizes para programas específicos. É órgão multi-ministerial presidido pelo Ministro de Estado de Minas e Energia.

- MME - Ministério de Minas e Energia. Encarregado da formulação, do planejamento e implementação de ações do Governo Federal no âmbito da política energética nacional.
- CMSE - Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico. Constituído no âmbito do MME e sob sua coordenação direta, com a função precípua de acompanhar e avaliar permanentemente a continuidade e a segurança do suprimento eletro energético em todo o território.
- CCEE - Câmara de Comercialização de Energia Elétrica. Pessoa jurídica de direito privado, sem fins lucrativos, sob regulação e fiscalização da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), com finalidade de viabilizar a comercialização no SIN (Sistema Interligado Nacional). Administra os contratos de compra e venda de energia elétrica, sua contabilização e liquidação.
- ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico. Pessoa jurídica de direito privado, sem fins lucrativos, sob regulação e fiscalização da ANEEL, tem por objetivo executar as atividades de coordenação e controle da operação de geração e transmissão, no âmbito do SIN.
- ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. Autarquia sob regime especial, vinculada ao MME, com finalidade de regular a fiscalização a produção, transmissão, distribuição e comercialização de energia, em conformidade com as políticas e diretrizes do Governo Federal.

Os Agentes Setoriais, por sua vez, também possuem funções distintas nesse meio ambiente:

- Agentes Geradores. São autorizados ou concessionários de geração de energia elétrica, que operam plantas de geração e prestam serviços ancilares;
- Agentes de Transmissão. Agentes detentores de concessão para transmissão de energia elétrica, com instalações na rede básica que é composta por linhas igual ou maior ao nível de tensão de 230 kV;

- Agentes de Distribuição. Operam um sistema de distribuição na sua área de concessão, participando do Sistema Interligado e sendo usuários da Rede Básica. Contratam serviços de transmissão de energia e serviços ancilares do ONS;
- Consumidores Livres. Consumidores que têm a opção de escolher seu fornecedor de energia elétrica, conforme definido em resolução da ANEEL;
- Agentes Importadores. São agentes titulares de autorização para implantação de sistemas de transmissão associados à importação de energia elétrica;
- Agentes Exportadores. São agentes titulares de autorização para implantação de sistemas de transmissão associados à exportação de energia elétrica;
- Agente Comercializador da Energia de Itaipu. Como a usina hidrelétrica de Itaipu é uma entidade binacional, pertencente ao Brasil e ao Paraguai, o relacionamento entre os dois países segue tratados internacionais específico. A energia de Itaipu recebida pelo Brasil representa cerca de 30% do mercado de energia da região sul/sudeste/centro-oeste. A comercialização dessa energia no Brasil é coordenada pela Eletrobrás.

1.3 Operação de Sistemas Elétricos

Os Sistemas Elétricos de Potência são umas das infra-estruturas básicas na nossa sociedade, sendo sempre requerida uma alta confiabilidade no seu funcionamento. Este sistema pode ser dividido em três subsistemas físicos: geração, transmissão e distribuição.

A energia elétrica é produzida por usinas geradoras, normalmente distantes dos grandes centros, a partir de diversas fontes de energia: hidráulica; térmica (através de combustíveis fósseis ou nucleares); ou fontes alternativas (eólica, biomassa, madeira, solar, resíduos).

No caso brasileiro, mais de 70% da energia elétrica produzida é resultante do parque gerador hidráulico. A energia elétrica é então imediatamente transferida através de sistemas de transmissão utilizando normalmente um nível de tensão mais elevado.

Os sistemas de transmissão são interligados como uma extensa rede de forma a aumentar a confiabilidade, conforme demonstrado na Figura 1.1 referente ao SIN. Nota-se que as bacias de geração hidráulica são representadas na cor “azul”, as principais linhas de transmissão em 500 kV em “vermelho”, denotando também as interligações com países vizinhos. Pode-se verificar na figura que em caso de deficiência de geração em uma determinada região, o sistema pode através

das linhas de transmissão, transmitir a energia de um sistema para outro, atendendo mutuamente em caso de emergência, ou suprindo os vizinhos durante períodos de estiagem, ou sazonalidades.

O SIN é organizado em regiões geoeletricas, denominadas: Sul (Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná e Mato Grosso do Sul); Sudeste-Centro Oeste (São Paulo, Rio de Janeiro, Espírito Santo, Goiás, Distrito Federal e Mato Grosso); Nordeste (todos os estados desta região menos Maranhão); Norte (Maranhão, Tocantins e Pará) e isolado (Amapá, Amazonas, Roraima, Acre e Rondônia).

As redes sistêmicas, que normalmente operam em anel com tensão menor que 230 kV são conhecidas como subtransmissão, estão presentes em todos os sistemas regionais e têm importância para atendimento as redes de distribuição e grandes cargas. Algumas cargas maiores podem estar conectadas diretamente na rede básica.

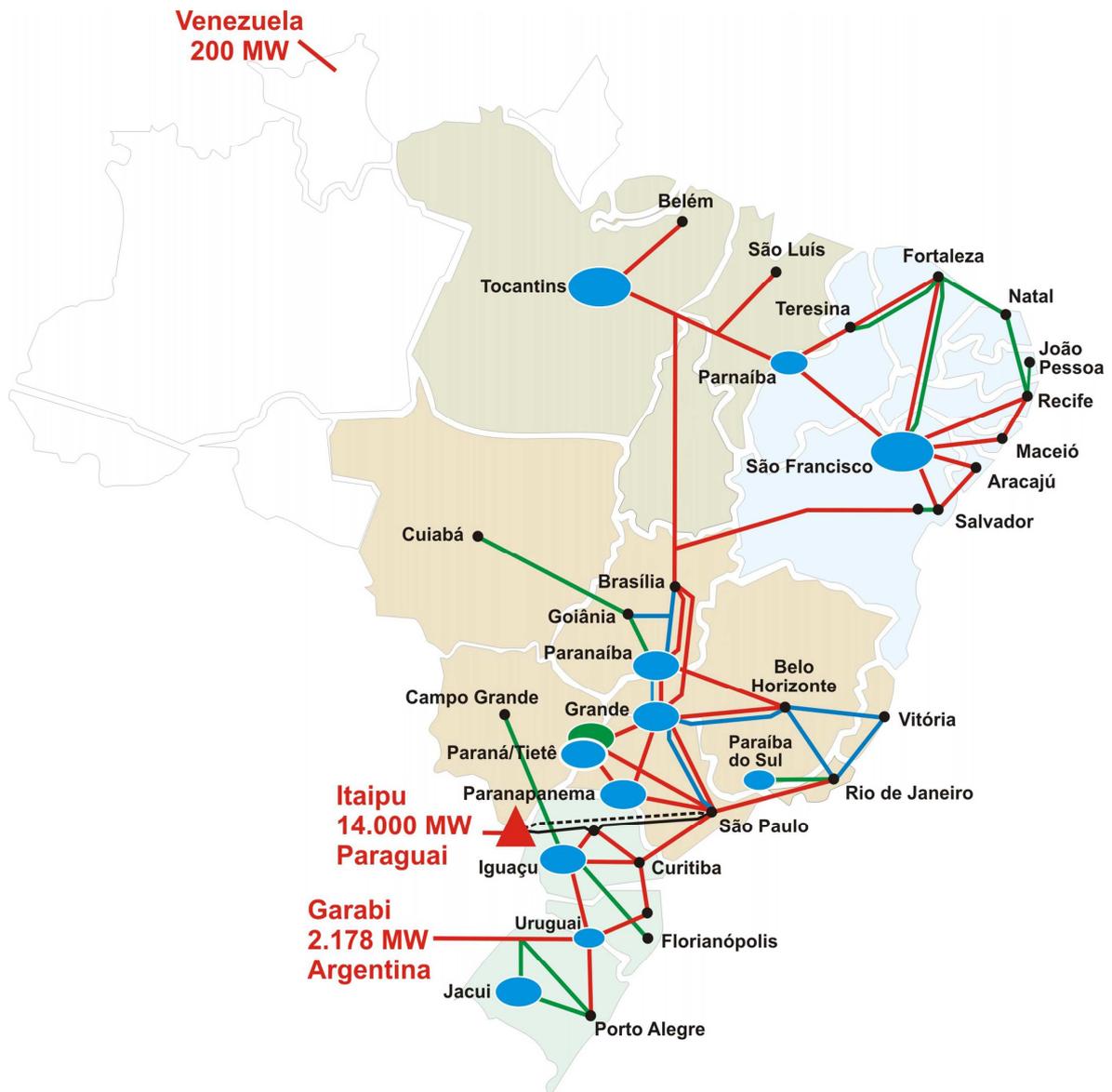


Figura 1.1 – Diagrama do SIN [2]

Dada à complexidade dos sistemas elétricos, faz-se necessário um equilíbrio constante entre a oferta e a demanda. A demanda de energia elétrica normalmente não mantém constante ao longo do dia. Períodos de pouca atividade econômica como início da manhã, apresenta um consumo menor de energia, conhecido como horário de carga leve. Ao final da manhã e meio da tarde nota-se picos de consumo, conhecido como horário de carga média, devido neste horário uma maior atividade industrial e comercial. Ao final da tarde e início da noite, normalmente nota-se um período maior de consumo, conhecido como ponta ou carga pesada, é quando normalmente ainda há uma determinada atividade industrial e comercial, aliada a um horário em que as pessoas retornam as suas casas utilizando equipamentos que consomem mais energia, como o caso do

chuveiro elétrico. Na Figura 1.2 é possível verificar esta modulação da carga no sistema ao longo de um dia útil.

A geração de energia elétrica, particularmente em cada usina, também sofre certo desequilíbrio, normalmente num período dentro do ano, em razão de escassez hídrica, custo de combustíveis fósseis, manutenção programada de unidades de geração, falhas, dentre outros problemas. O balanço constante entre a oferta e demanda de energia, torna a operação dos sistemas desafiante e com uma grande complexidade.

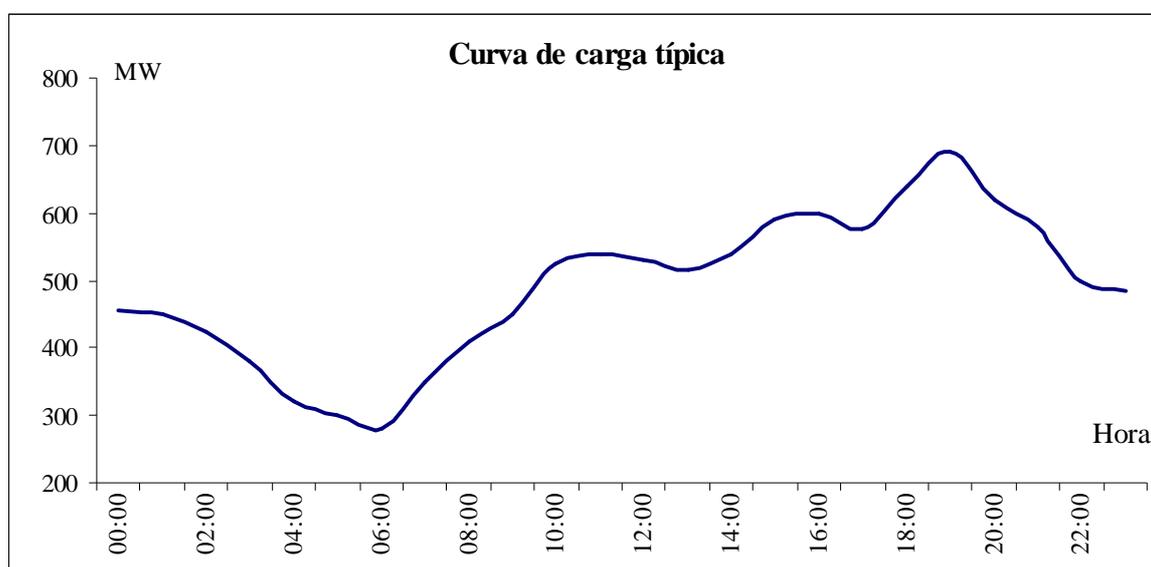


Figura 1.2 – Representação da curva de carga ao longo de um dia em um Sistema Elétrico [3]

Para conexão entre a geração e a carga existem as redes elétricas, imprescindíveis para a transmissão da energia, principalmente em países como o Brasil, onde a geração, predominantemente hidráulica está situada a longas distâncias dos centros consumidores. As redes elétricas estão sujeitas aos desligamentos programados ou não, que podem influenciar o fluxo da energia sujeitando todo o sistema a estresses em razão das distâncias envolvidas e de eventuais gargalos físicos existentes.

Ressalta-se que os sistemas de transmissão e subtransmissão, para obter maior confiabilidade, operam em forma de anel, com múltiplas interligações entre as usinas e subestações. Já os sistemas de distribuição normalmente operam de forma radial para favorecer uma melhor coordenação da proteção.

Para o sistema elétrico brasileiro, há uma hierarquia referente a rotina de operação. Cabe ao ONS coordenar toda a operação do sistema de transmissão e usinas de geração. As redes básicas

são monitoradas pelos CRO's (Centros Regionais de Operação) do ONS, sediados em Recife, Rio de Janeiro e Florianópolis, cabe às empresas transmissoras os comandos sobre as linhas. As funções a cargo do ONS, conforme a Figura 1.3, é explicada a seguir e relacionadas à gestão da operação do setor elétrico brasileiro [2].

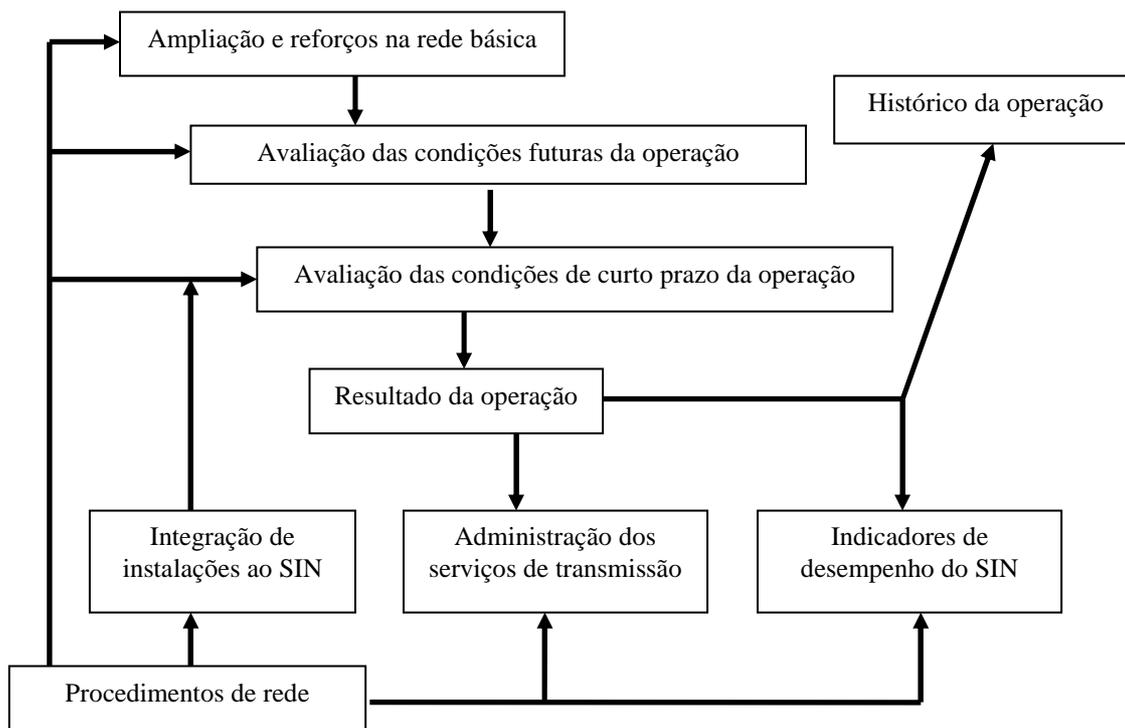


Figura 1.3 – Atuação do ONS sobre o SIN [2]

- Ampliações e reforços na rede básica. Por meio do Plano de Ampliações e Reforços que é elaborado a cada ano, com um horizonte de três anos, o ONS analisa e propõe as obras do sistema de transmissão necessárias para preservar o desempenho e a segurança do suprimento, e possibilitar o livre acesso aos agentes conectados à Rede Básica.
- Avaliações das condições futuras da operação. O ONS é responsável pela elaboração de estudos elétricos, de análise do desempenho da rede de transmissão, e energéticos, de gestão do uso dos recursos disponíveis para produção de energia, com diferentes horizontes de análise, em que são avaliadas as condições futuras de suprimento. Os resultados desses estudos sinalizam para os agentes associados e as

autoridades setoriais a necessidade de eventuais medidas de curto prazo que possibilitem o atendimento do mercado consumidor dentro de padrões técnicos de continuidade, segurança e economicidade do suprimento.

- Avaliação de curto prazo da operação. Os estudos de segurança operacional visam a manter e aumentar a capacidade do SIN de suportar contingências extremas, originadas por defeitos múltiplos. Envolvem a concepção de medidas automáticas para prevenir e minimizar a ocorrência de grandes perturbações, evitarem sua propagação e reduzir o tempo de restabelecimento do sistema é as diretrizes básicas desses estudos. Os estudos de planejamento operativo de curto prazo servem de base para a definição das metas e diretrizes que são seguidas na programação diária e na operação em tempo real. Englobam os estudos quadrimestrais e mensais que estabelecem as Diretrizes para a Operação Elétrica e os Programas Mensais de Operação, em que são definidas metas e diretrizes para a otimização dos recursos de geração e transmissão a cada semana do mês.
- Procedimentos de Rede. É um conjunto de documentos que estabelecem as regras, metodologias e procedimentos técnicos indispensáveis para o pleno exercício das atribuições do ONS. Eles detalham o planejamento e a programação da operação eletro energética, a supervisão e o controle da operação integrada do sistema, a proposição de ampliações e reforços na Rede Básica e a administração dos serviços de transmissão. Em sua gestão, o operador visa compatibilizar as regras que norteiam a operação do SIN e o relacionamento com seus associados com a experiência operativa e a regulamentação do setor [4].
- Integração de instalações ao SIN. Visando garantir o livre acesso à rede aos novos usuários e permitir a entrada em operação de novas instalações de geração e transmissão, o ONS elabora estudos e análises visando à correta integração dessas ao SIN. O processo de integração compreende as seguintes etapas: solicitação e emissão do Parecer de Acesso, estudos pré-operacionais e de comissionamento, e estudos de proteção.
- Administração dos serviços de transmissão – cabe ao ONS realizar a administração dos serviços na Rede Básica, o que inclui a gestão dos contratos de uso do sistema de transmissão por geradores, distribuidores e consumidores livres, bem como os contratos de prestação do serviço, por parte dos proprietários das redes. Também envolve a gestão de novas solicitações de acesso e conexão à rede e o

estabelecimento de padrões de desempenho. Inclui ainda a contabilização e liquidação dos encargos de transmissão e os serviços ancilares.

- Resultados da operação – a operação em tempo real do SIN é coordenada pelo CNOS (Centro Nacional de Operação do Sistema) e pelos CRO's do Sistema e ele subordinados. Suas ações fazem o monitoramento e correção das condições operativas em função das variações da carga e das condições de funcionamento dos equipamentos que compõem o SIN a cada instante. Os resultados da operação do SIN são disponibilizados aos agentes e a sociedade via internet por meio de Boletins e Informes com diferentes horizontes e objetivos específicos.
- Indicadores de Desempenho do SIN – o monitoramento do desempenho da operação do SIN é uma função do ONS essencial para garantir a qualidade do fornecimento de energia aos diversos consumidores. Os indicadores de continuidade do serviço na Rede Básica de transmissão são apurados nas instalações que formam a fronteira entre a Rede Básica e as demais instalações do sistema. São a Duração da Interrupção do Ponto de Controle (DIPC) e a Freqüência da Interrupção do Ponto de Controle (FIPC). Os indicadores de qualidade da operação mostram a evolução do número de perturbações no sistema e de seu impacto sobre o atendimento aos consumidores. Faz parte desse conjunto o número de perturbações que resultaram em cortes de carga, o índice de robustez do sistema e a energia não suprida.
- Histórico da operação – o ONS mantém e divulga regularmente à sociedade um banco de dados históricos com os principais parâmetros da operação do SIN. São informações sobre o consumo de energia, produção de eletricidade das usinas, níveis de armazenamento de reservatórios, afluências às usinas hidrelétricas, dentre outros, em base anual, mensais e diárias.

As empresas distribuidoras que controlam suas redes de subtransmissão com tensão até 138 kV, mantêm comunicação com os CRO's do ONS. Algumas destas linhas são consideradas sistêmicas, pois através do fechamento de anéis tem forte implicação na operação de mais de um sistema, podendo limitar os níveis de transferência de energia entre os subsistemas, implicando até em restrições severas de atendimento em determinadas condições elétricas, em razão disto estas linhas podem ser monitoradas nos CRO's.

1.3.1 Recursos utilizados na operação

Para operação do sistema faz-se necessários recursos específicos a serem utilizados nas atividades rotineiras em regime permanente, bem como nas emergências. A maior parte das atividades é desempenhada no dia a dia, e são relativas aos controles de tensões, gestão dos documentos operativos, programação de desligamentos e energização de equipamentos, são acompanhados os alarmes e eventos e verificados possíveis defeitos em alguns equipamentos.

O pessoal técnico utilizado são recursos importantes para as empresas. Mais recentemente, devido à certificação ser uma exigência para operação conjunta com o ONS, surgiu novas metodologias, incluindo até a normatização da fraseologia utilizada entre os centros, houve uma maior disseminação do treinamento e valorização dos profissionais. Usualmente o treinamento de um novo operador para o sistema elétrico é feito com aulas teóricas e a prática é obtida operando o sistema real. Este processo é incompleto visto que um operador pode passar anos trabalhando sem nunca antes ter se deparado com uma situação grave de emergência como um blecaute. A experiência no mundo tem mostrado que um eficiente treinamento só pode ser alcançado, de forma adequada e em curto prazo, empregando-se simuladores para treinamento de operadores [5].

Outros recursos não menos importantes são: a infra-estrutura de telecomunicação e edificações. Os Centros de Operação operam em regime contínuo, com utilização de recursos tecnológicos cada vez mais sofisticados. Em razão da desassistência cada vez maior das subestações e usinas geradoras, tornou-se imprescindível sistema de telecomunicação cada vez mais confiáveis. É normal a utilização de sistemas redundantes tanto no nível de comunicação como a nível computacional, em que muitas vezes a transferência de um para o outro é até imperceptível.

1.3.2 Procedimentos e documentações operacionais

No setor elétrico, poucas áreas desenvolveram procedimentos tão bem utilizados como os setores de operação e manutenção. Desde há muitos anos são escritos procedimentos operacionais a partir de ampla discussão, isto tem facilitado inclusive mais recentemente a adoção de certificados de qualidade ISO-9000 nestes locais. Há também nos COS (Centro de Operação do Sistema)/CRO farta documentação dos principais eventos e ocorrências, registro em banco de dados e históricos de grandezas analógicas, que acabam facilitando outras áreas como planejamento, engenharia e manutenção das empresas.

1.3.3 Sistemas de Supervisão e Controle

É o cérebro do Centro de Controle moderno. Composto por conjuntos específicos de *hardware* e *software*, responsáveis pela coleta, tratamento, armazenamento e visualização dos dados e emissão de comandos de controle de forma automática ou manual para as subestações ou usinas geradoras. Os sistemas evoluíram nos últimos anos, no entanto mantêm suas características de sistema SCADA (Sistema de aquisição de dados, supervisão e controle). Muito embora os SCADA possam ser utilizados em todos os tipos de atividades industriais, é nos centros de controle de empresas elétricas que encontram um vasto campo de aplicações.

O funcionamento de um sistema SCADA pode ser descrito da seguinte forma: um computador central, normalmente instalado em COS/CRO, solicita continuamente as informações das instalações em campo, utilizando um meio de comunicação qualquer. As instalações respondem as solicitações, informando se houve mudança de estado de equipamentos ou variação de grandezas analógicas. O processo é cíclico, normalmente uma UTR (Unidade terminal remota) responde de cada vez, conforme descrito na Figura 1.4.[6] Quanto mais UTR's instaladas, maior tempo levará para observar todo o sistema, podendo tornar o processo de supervisão mais lento.

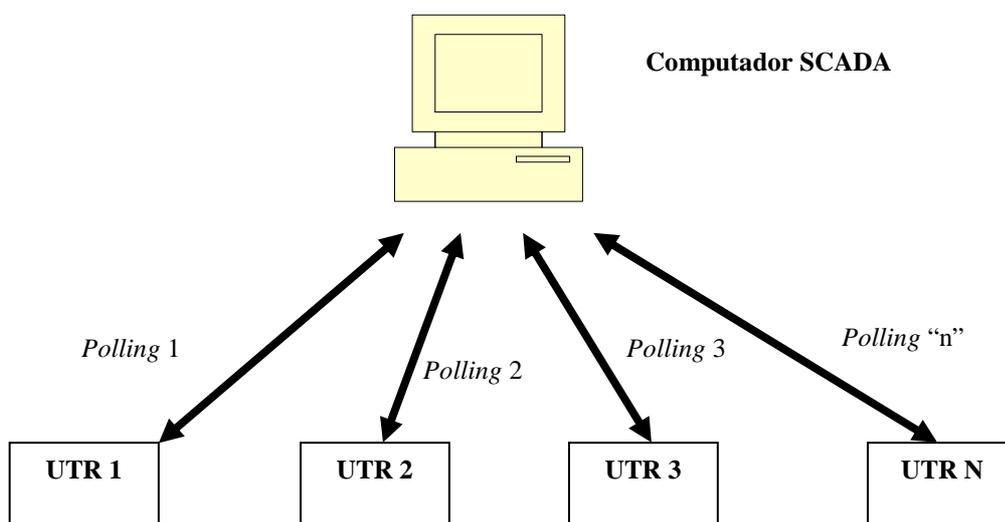


Figura 1.4 – Diagrama de interrogação entre o SCADA e a UTR

Os SCADA's mais tradicionais, conforme representado na Figura 1.5, são limitados, normalmente com apenas um processador ou computador central, que concentrava todas as atividades críticas de I/O (entrada de dados e saída de comandos) utilizando recursos de

comunicação serial. Também era o responsável pelo armazenamento, tratamento e consulta aos dados para a operação. Em caso de falha do computador central, todo o processamento do sistema é interrompido. Alguns SCADA's dispõem de certa redundância. Caso de falha, outro computador, com mesmo banco de dados passava a efetuar o processamento, este chaveamento entre computadores pode levar alguns segundos.

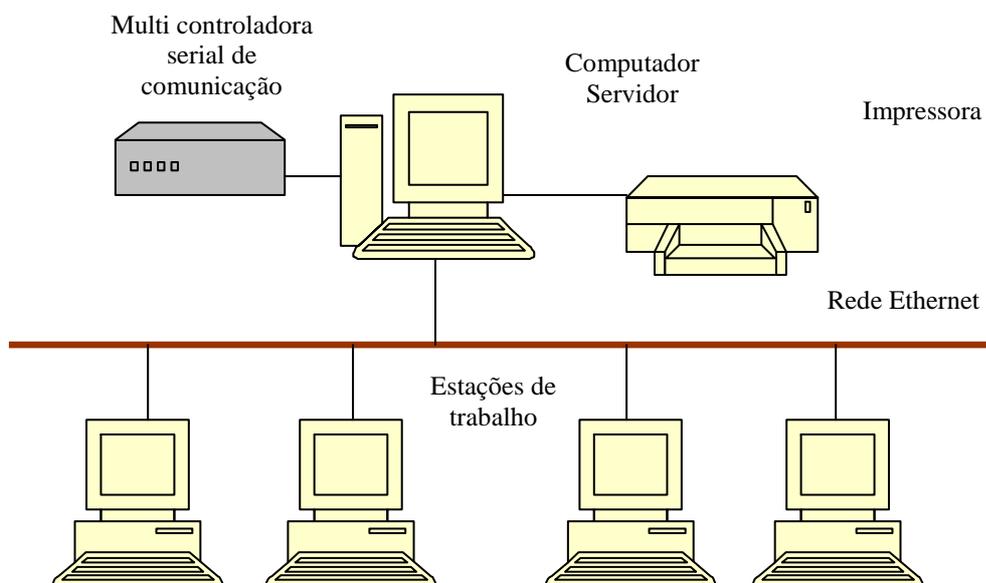


Figura 1.5 – Diagrama de um SCADA mais simples com configuração comunicação serial

A UTR funciona em campo como um computador com características industriais, com entradas e saídas de sinais. É o responsável direto pela comunicação com os equipamentos instalados nos pátios das subestações, casas de força, geradores, transformadores, etc.. Conforme apresentado na Figura 1.6, a UTR é composta basicamente por um processador central, modem ou roteador de comunicação, módulos de relés auxiliares de entradas e saídas de sinais, bem como conversores de sinais analógicos em digitais. Por estar localizada normalmente em um ambiente considerado hostil, com interferências mais diversas possíveis, é adequado que estes equipamentos sejam robustos, dispendo de boa proteção e isolamento.

A UTR trabalha com uma gama diferente de tipos de informações, podem ser informações tanto de entrada como de saída. As informações de entrada mais usuais são as entradas digitais simples, que representa um *bit*, valor 0 ou 1. Há também entradas analógicas para representar de forma discreta os valores como de corrente e tensão. Outro tipo de dados são as saídas digitais, como comandos *ON* ou *OFF*.

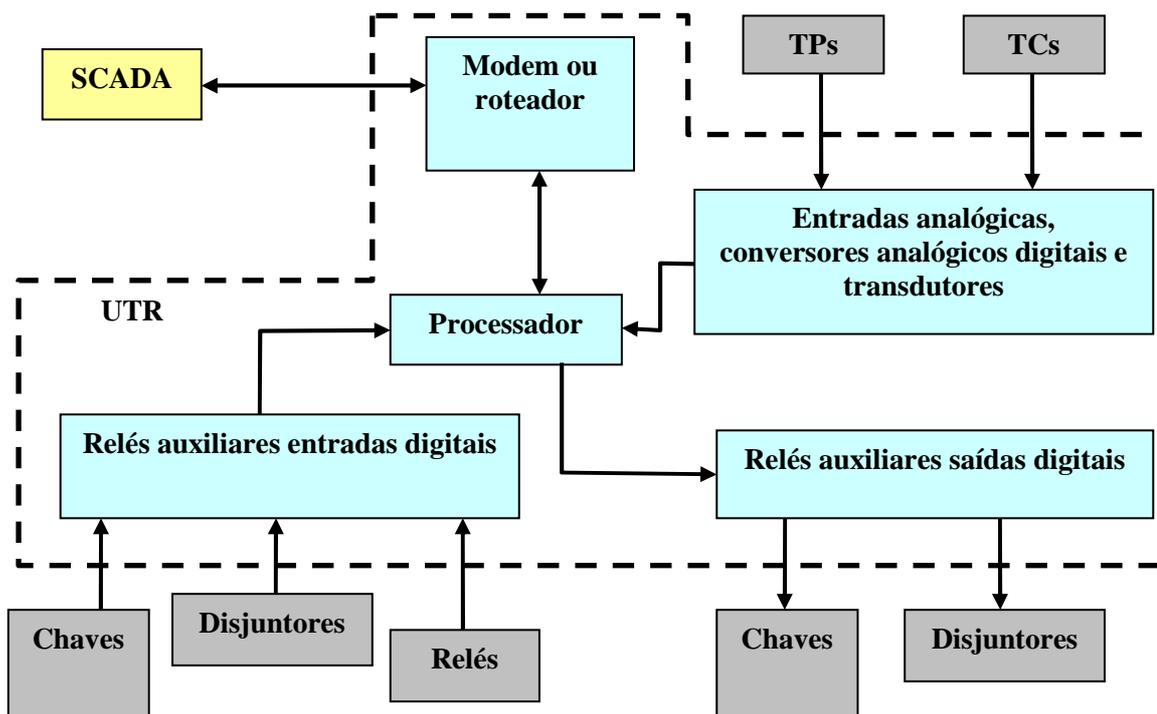


Figura 1.6 – Diagrama típico de uma UTR

Inicialmente nos anos 1970, para comunicação com as UTR's utilizava-se comunicação serial, controle de acesso mestre-escravo. Os protocolos de comunicação utilizados na época, como MODBUS [7] eram simples com pouco volume de dados transmitidos. As informações suficientes para monitoração eram algo como um simples estado de um ponto representado por um *bit* indicando estado de uma chave, aberta/fechada. Algumas UTR's trabalhavam com 256 endereços diferentes, em muitos casos era o suficiente para representar toda uma subestação. As grandezas analógicas tinham uma resolução precária, muitas vezes bastavam 4.096 níveis discretos para representar o fundo de escala de determinadas grandezas. Obviamente que a tecnologia de processamento dos computadores acabava por limitar bastante as aplicações.

Recentemente, em razão do aprimoramento da eletrônica, surgiram as IED's (Dispositivos eletrônicos inteligentes), como uma alternativa importante as UTR's. Mais compactas, velozes, com custo inferior e maior capacidade de programação e calculo [8]. Na Figura 1.7 observa-se esta nova tendência, neste caso as IED's são posicionadas de uma maneira descentralizada quando comparado com as UTR's.

Caso de algum problema ocorrer com uma determinada IED, as demais não serão afetadas mantendo uma melhor condição de confiabilidade. As IED's mais modernas, quando instaladas nos

bay's das subestações e usinas, além de economizarem na fiação dos circuitos de TP's (transformadores de potencial) e TC's (transformadores de corrente), podem inclusive substituir os relés de proteção, através de ampla capacidade de programação e processamento em alta velocidade [9].

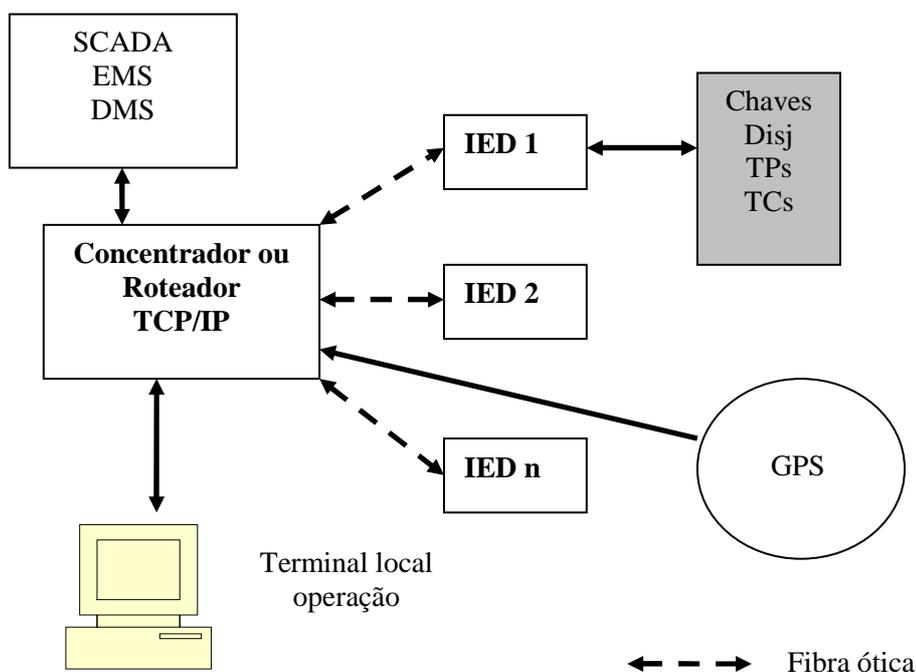


Figura 1.7 – Diagrama típico de uma subestação telecontrolada através de IED's modernas

Os aperfeiçoamentos dos equipamentos de telecontrole instalados em campo permitiram inclusive a adoção do SOE (Seqüencial real de eventos), possibilita através de sincronização, saber exatamente a seqüência real em que os equipamentos atuaram. As IED's sincronizadas através de relógio baseados em GPS (Sistema de posicionamento global) podem registrar os eventos ocorridos em campo com precisão de milissegundos, abrindo possibilidade para análise precisa das atuações dos relés de proteção.

Os sistemas abertos de comunicação, seguindo o modelo OSI (Interconexão de sistemas abertos) [10], padronizado pela ISO (Organização internacional de padronização), permitiram uma melhor interconexão entre diferentes fabricantes. Facilitaram o surgimento dos protocolos abertos padrão IEC (Comissão eletrônica internacional) [11] e DNP 3.0 (Protocolo distribuído de rede) [12].

Estes protocolos de comunicação têm sua documentação aberta e são bastante abrangentes para o telecontrole de subestações e plantas industriais. Possuem muitas funções, permitem a

transmissão de arquivos e grandeza analógica com alta precisão. Às vezes, a grande gama de funções nos protocolos é menosprezada pelos integradores dos sistemas, que desenvolvem o SCADA, limitando a conectividade de seu sistema com determinados modelos de equipamentos. Citando como exemplo, o protocolo IEC-870 [11] possui mais de 100 funções diferentes. Porém, para operar adequadamente um sistema elétrico, pode ser utilizado menos de um quinto das funções previstas. O desenvolvedor do SCADA acaba abrindo mão de usar todas as funções em seu *driver* de comunicação, não vê qualquer motivo para tornar o sistema compatível com todas as funções, neste caso se a concessionária adquirir um equipamento de campo mais moderno, pode ocorrer de não ser compatível com seu SCADA existente.

O emprego nos últimos anos de comunicação através de rede *Ethernet* e protocolo TCP/IP (protocolo de Internet e controle de transferência de dados), significaram um grande avanço nos sistemas que tradicionalmente faziam a comunicação mestre-escravo de ponto a ponto, aumentando a agilidade e tempo de resposta. Os sistemas modernos permitem atualização de milhares de pontos digitais ou analógicos por segundo e comunicação de forma não mais mestre-escravo, mas sim em ambas as direções.

Atualmente, os supervisórios modernos, conhecidos como EMS (Sistemas de Gestão de Energia) ou DMS (Sistemas de Gestão da Distribuição) são mais complexos, possuem uma arquitetura de processamento distribuída, apresentam processadores ou computadores dedicado a diversas funções, que normalmente são: comunicação; banco de dados; telas gráficas; displays (telões); estação para treinamento; estimador de estado entre outros. Conforme Figura 1.8 nota-se um processamento distribuído, comunicação com os equipamentos de campo através da própria rede *Ethernet*, e a presença de um computador dedicado para estimação de estados de equipamentos que estão sem informação, utilização de sistema especialista, fluxo de potência em tempo real e simulador para o treinamento de operadores.

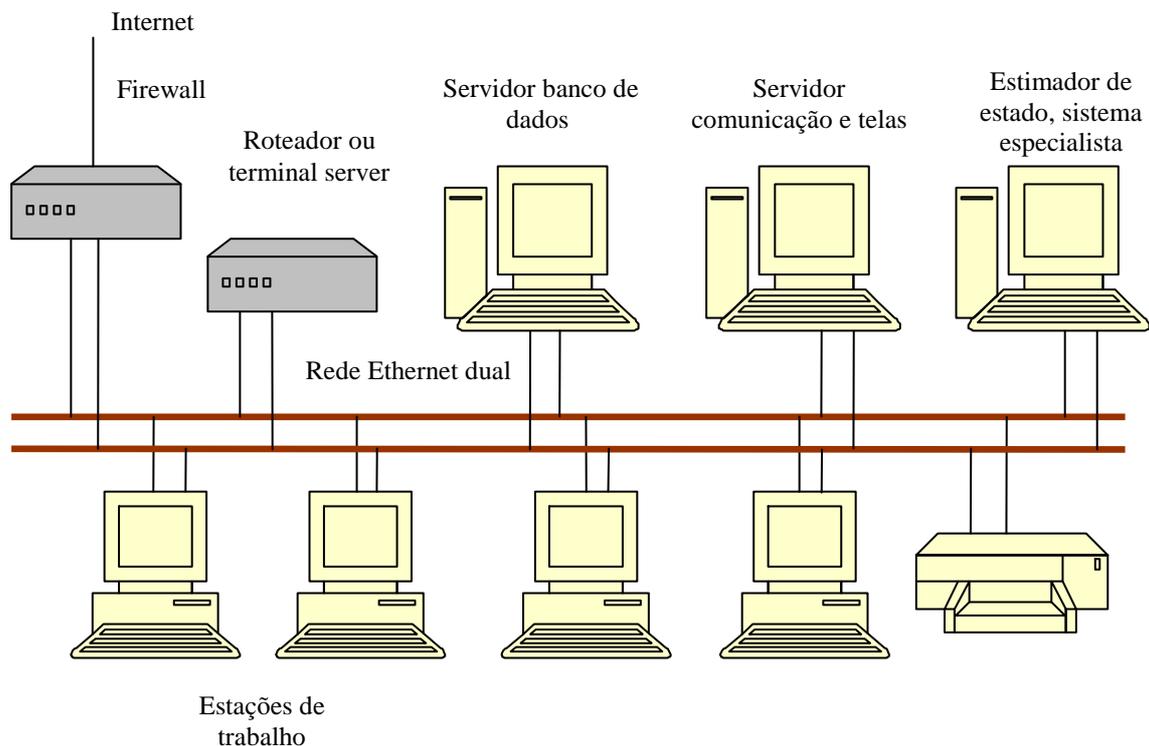


Figura 1.8 – Diagrama de um sistema SCADA moderno

Tanto os sistemas tradicionais, quanto os modernos, podem utilizar diferentes plataformas de hardware ou software. Os baseados em computadores *mainframe* foram sistematicamente desativados e substituídos por computadores servidores ou microcomputadores padrão PC. Os sistemas operacionais mais utilizados são baseados em UNIX [13], a exemplo do QNX [14] que apresenta performance mais adequada para tarefas em tempo real e alta performance. O QNX é um sistema operacional utilizado há muito tempo por profissionais que necessitam de equipamentos com estabilidade total na realização das tarefas. Baseado na plataforma UNIX, este sistema é seguro e estável, tornando-se uma excelente alternativa para profissionais que trabalham com robustos aplicativos da área gráfica e processos de automação. Os sistemas baseados em MS Windows [15] têm interfaces gráficas mais modernas e amigáveis. Há uma tendência de utilizar plataformas mais velozes no processamento e banco de dados, e plataforma MS Windows para visualização gráfica das telas, como uma estação bem amigável para os operadores.

1.4 Recomposição de Sistemas Elétricos

1.4.1 Blecautes

Embora nos países mais avançados, são utilizados equipamentos sofisticados, linhas de transmissão e usinas em abundância, ainda há problemas relacionados aos blecautes. Em 14 de agosto de 2003, às 14 horas, diversas linhas de transmissão no norte do estado de Ohio nos Estados Unidos sucumbiram em razão de sobrecorrente, causando desligamentos em série. Juntamente a este problema as companhias elétricas não estavam gerando energia suficiente, culminando com um grande blecaute às 16 horas, desestabilizando todo o sistema elétrico no leste da América do Norte, causando o maior blecaute da história naquela região [16].

A quantidade de grandes blecautes que deixam mais de 50.000 consumidores simultaneamente sem energia vem aumentando há mais de uma década [17]. Além da inconveniência sobre o dia-a-dia das pessoas, os blecautes causam grandes prejuízos econômicos. Alguns estudos mostram que quando há falta de energia há um custo social invisível, que pode ser muitas vezes superior ao prejuízo para a concessionária devido ao não fornecimento desta energia [18].

O mais importante é que talvez a rede elétrica como um todo devesse ser mais inteligente. A maioria dos equipamentos que cuidam do fluxo de potência data dos anos 70. Esse sistema de controle normalmente não é bom o bastante para monitorar problemas em tempo real, enquanto eles estão acontecendo, ou para responder o mais automaticamente possível visando isolar as complicações antes que elas se ampliem devido ao efeito cascata.

Cada ponto da rede elétrica deveria estar alerta e pronta para responder e manter a comunicação com os demais. Acontece que a informação que os operadores recebem nos COS, para tomada de decisão é esparsa e no mínimo 10 segundos atrasada, sem contar as falhas existentes nos sensores ou relés, só são notadas quando deveria funcionar, isto acaba por impossibilitar uma reação rápida o bastante. Um sistema automático, com mais inteligência, e com certa redundância, inclusive com capacidade para uma auto-regeneração, poderia reduzir a quantidade de blecautes. Isto é uma tendência cada vez mais forte na operação de sistemas elétricos, um sistema de recomposição automática pode ser parte de uma futura tecnologia, muito próxima de acontecer.

O sistema de transmissão se tornou vulnerável a blecautes por causa do esforço de um século para reduzir as perdas elevando cada vez mais a tensão elétrica para transmissão de grandes blocos de energia [17]. Isto possibilitou linhas cada vez mais longas interligando sistemas

diferentes. As interligações acabaram por permitir um equilíbrio crítico entre a oferta e a demanda, com principal objetivo de maximizar os recursos investidos na geração de energia frente a uma demanda cada vez maior.

Toda esta interconectividade traz certos riscos, permitindo que os problemas propagem de um determinado sistema à outro adjacente. Um imenso blecaute em 1965 no Nordeste americano levou as companhias elétricas daquele país a criarem o NAERC (Conselho de confiabilidade elétrica norte americano), visando coordenar os esforços no aumento da confiabilidade dos sistemas. Entidades semelhantes existem em outras partes do planeta.

Falta de investimentos, aumento do preço dos combustíveis e desregulamentação de alguns setores da área de energia elétrica também favoreceu a ocorrência de blecautes, a exemplo do ocorrido em 2003 no nordeste dos Estados Unidos [16]. Aos poucos, os setores de transmissão de energia em diversos países têm se tornado um mistura confusa de serviços regulamentados e desregulamentados, com várias empresas controlando seções fragmentadas.

Em muitos países a desregulamentação do setor elétrico atraiu mais investimentos para o setor de geração. O setor de transmissão, devido ainda a uma forte regulamentação, continuou dependendo de linhas e subestações ultrapassadas, com muitos anos de construção. É comum em grandes subestações encontrar relés de proteção digitais ao lado de eletromecânicos com mais de 40 anos de uso, isto exemplifica a dificuldade de interconexão dos sistemas. Neste caso às vezes um SCADA mais moderno comanda parte da instalação, recentemente ampliada, enquanto que outra parte ainda depende de um SCADA mais antigo para ser comandado. Sem ter uma interoperabilidade adequada, como nos sistemas abertos mais modernos, acaba levando o operador a ter que monitorar dois computadores ao mesmo tempo.

1.4.2 Filosofia de recomposição

Dada a necessidade de que a recomposição do SIN seja feita de forma rápida e segura, independente da dimensão e da abrangência da perturbação, foi elaborada uma filosofia geral de recomposição no Brasil [2], com a participação mais independente possível dos operadores dos COS de diferentes empresas separados por áreas prioritárias.

Visando agilizar ao máximo o restabelecimento das cargas prioritárias, sem comprometer a segurança, as ações de recomposição do sistema, após uma perturbação geral, foram divididas em duas fases distintas: *fase fluente* e *fase coordenada*. Ressalta-se que é entendido como tendo ocorrido uma perturbação geral, quando não houver tensão em todos os terminais das linhas de transmissão e, conseqüentemente, no barramento ao quais as mesmas estão conectadas.

Define-se por fase fluente a primeira fase do processo de recomposição que se iniciará com a sincronização de unidades geradoras ou recebimento de tensão por circuitos pré-determinados, a partir dos quais se sucederão a energização de transformadores e de outras linhas de transmissão, também já predeterminados, com a finalidade de atender os centros de carga prioritários. Esta fase deverá se processar com a atuação exclusiva, preferencialmente, das subestações, cabendo aos CRO's e COS, a supervisão. Logo após a subestação se situar do ocorrido e tomar as providências relativas à fase fluente deve informar ao CRO o término da mesma e a configuração atual da subestação [19].

Define-se por fase coordenada do processo de recomposição a fase seguinte à fluente, que deverá ser realizada necessariamente com a participação dos CRO's e COS. Nesta fase se dará a energização dos demais equipamentos, a liberação de tomada de carga adicional e, quando for o caso, o fechamento de paralelo e/ou anel entre áreas que não foram interligadas durante a fase fluente.

Igualmente importante é a recomposição de sistemas elétricos nas condições em que não se caracterize a ocorrência de uma perturbação geral. Nestas condições os grupos de estudos definem as condições permitidas para energização de equipamentos que compõem o sistema por inteiro, conferindo à sua operação maior confiabilidade ou permitindo recomposição de montantes maiores de cargas. O conhecimento relativo à recomposição do sistema, necessário para orientação dos operadores, quer seja em perturbações gerais ou não, encontra-se descrito nas IO's (Instruções de operação).

As IO's são criadas a partir de testes em emuladores como analisadores de transitório ou programas de fluxo de potência, análise dinâmica e outras ferramentas afins, e refinadas pela experiência dos técnicos [20]. Estas instruções se modificam ao longo do tempo e as IO's são sempre revisadas. Desta forma, o desenvolvimento de qualquer ferramenta auxiliar para uso dos operadores, encontrará nestas instruções a base necessária para validação da ação sugerida por tal ferramenta.

1.4.3 Técnicas de recomposição assistida por sistema computacional

Blecautes em sistemas elétricos de potência, quando ocorrem, os seus efeitos na sociedade são relativamente severos. O mais importante após grandes ocorrências é restaurar o serviço de distribuição de energia elétrica o mais rápido possível. No intuito de reduzir os efeitos sobre a sociedade, as companhias elétricas têm instruções pré-estabelecidas de como recompor o sistema elétrico. Estas instruções possuem passos que os operadores devem seguir para recompor todo o sistema. No entanto, logo após a ocorrência de blecautes existe uma situação de grande

stress, juntamente com o fato de que as condições básicas previstas nas instruções escritas de operação podem não estar presente para permitir o sucesso da recomposição, como níveis de tensão nas barras de origem que estejam fora de limites, proteções de linhas atuadas, entre outras limitações.

A grande razão do insucesso nas tentativas de recomposição do sistema reside no fato de que as condições que prevalecem no sistema podem ser muito diferentes das condições presumidas quando da elaboração das instruções de recomposição. Nos anos recentes tem havido vários estudos sobre novas técnicas de recomposição e alternativas para os métodos comumente utilizados. Enquanto estas técnicas podem variar em detalhes de implementação, pode-se dizer que existem três princípios de propostas de recomposição do sistema [21]:

- a) **Recomposição automática:** Nesta técnica, programas computacionais especialistas no EMS, associados ao SCADA dentro de centros de controle possuem a capacidade de elaborar um plano de recomposição e efetuá-la automaticamente.
- b) **Recomposição assistida por computador:** Nesta técnica, após um distúrbio o programa computacional além de adquirir as informações do sistema através do SCADA/EMS, irá elaborar um plano de recomposição, porém a ordem para efetuá-la parte do operador do sistema e não do programa computacional. Em conjunto também serão utilizadas outras ferramentas computacionais, tais como: análise de fluxo de carga e análise de contingência. Ao contrário da recomposição automática, a decisão final de cada passo do processo cabe ao operador.
- c) **Recomposição cooperativa:** Nesta técnica um programa computacional de recomposição, utilizando dados colhidos do SCADA/EMS proporá um plano de recomposição do sistema. Baseado neste plano o operador do sistema irá efetuar os comandos para recompor o sistema. Seria o equivalente a um plano de vôo, onde todas as instruções do que fazer está escrito, cabendo ao piloto, em caso de necessidade a possibilidade de modificações no plano.

A literatura indica um grande interesse por parte das companhias elétricas em utilizar o princípio de recomposição cooperativa. A técnica mais utilizada nas publicações científicas são os sistemas especialistas baseado em regras [20] e a abordagem de programação matemática [22]. Ambas as técnicas produziram bons resultados, no entanto ainda estão em fase embrionária nas empresas. As grandes limitações residem no tempo necessário para executar o plano de recomposição, que no caso de grandes sistemas elétricos pode levar vários minutos e na necessidade de atualização das regras, conforme o sistema vai sendo expandido.

Vários algoritmos de busca têm sido implementados através de pesquisas científicas para encontrar a configuração final do sistema, tais como: busca heurística [23], busca tabu [24] e algoritmos de otimização evolucionários, tais como, algoritmo genético [25] e Enxame [26]. Depois de encontrado uma configuração pós-perturbação do sistema, é necessária à execução de programas de cálculo de fluxo de potência para verificar a sua aplicabilidade.

O tempo computacional requerido e a capacidade de executar um plano de recomposição sob determinadas condições de falta inesperadas é crítico na estimação da recomposição do sistema elétrico.

1.5 Necessidade de uma ferramenta computacional de auxílio a recomposição

A crescente complexidade dos sistemas elétricos de potência vem exigindo o desenvolvimento de técnicas cada vez mais sofisticadas para supervisão, controle e automação. Embora atualmente o setor elétrico possua sistemas computadorizados de supervisão e controle, estes em geral somente substituem ou complementam os sistemas convencionais. Todo o conhecimento sobre o planejamento e a operação do sistema elétrico continua sendo privilégio de alguns especialistas, isto é, de pessoas capazes de tomar decisões a partir da lógica, heurística, experiência e, até mesmo intuição [27].

Com a expansão e interligação cada vez mais freqüente das redes de energia, a operação do sistema tem se tornado mais complexa, aumentando o risco enfrentado pelos operadores. Além disso, a quantidade de energia sob responsabilidade de cada operador tem aumentado a cada ano. Existe, portanto, uma necessidade de fornecer subsídios para apoiar estes especialistas em situações mais complexas.

Isto torna atraente a utilização de novas técnicas computacionais no apoio a operação, tanto na tomada de decisão quando em simuladores para treinamento dos operadores. Nota-se um interesse cada vez maior na aplicação de sistemas computacionais para auxiliar os operadores na solução de problemas bastante diversificados como planejamento, operação, recomposição e diagnose.

Conforme descrito no início deste trabalho, destaca-se a importância e os desafios da operação do setor elétrico para a sociedade como um todo. Os problemas operacionais verificados são inerentes a complexidade cada vez maior das redes elétricas, com uma integração cada vez mais presente, inclusive com países vizinhos. O sistema elétrico continua frágil quando da

ocorrência de eventos não previstos, a exemplo dos blecautes, que conforme a literatura continua freqüente e cada vez com maior severidade.

Os sistemas elétricos quando em regime permanente, conseguem manter um equilíbrio constante entre a geração e a demanda. Os grandes problemas ocorrem quando das ocorrências de blecautes, muitas vezes as condições escritas nas instruções não são exatamente as mesmas encontradas no sistema quando da sua recomposição. Isto torna o problema da recomposição um dos mais desafiadores na operação.

Destaca-se que o problema de recomposição é conhecido como otimização combinatória, não linear e com restrições. A complexidade de tal problema trás dúvidas com relação à efetividade dos procedimentos escritos de recomposição baseados em diretrizes pré-estabelecidas [28].

De fato, a recomposição de sistemas elétricos, em razão da sua natureza, é relacionada aos problemas conhecidos como NP-completo [29], que é um subconjunto de problemas relacionados à tomada de decisão, de difícil solução e que apresentam um resultado aproximado. Pode-se afirmar que, os problemas NP-completo se fossem resolvidos com o objetivo de encontrar um resultado exato, dependeriam de um tempo praticamente infinito.

Considerando que os últimos adventos tecnológicos permitiram uma maior monitoração e controle dos sistemas elétricos, considerando que os computadores e técnicas modernas de otimização e buscas estão cada vez mais ágeis, é justificável a aplicação de novas técnicas para auxílio a operação dos sistemas.

Com ferramentas matemáticas, técnicas de otimização cada vez mais avançadas, aliado a tecnologia disponível no mercado, cada vez melhor na supervisão e controle de sistemas, há grande possibilidade de desenvolvimento de aplicativos para auxílio na recomposição de sistemas elétricos, que reduzam o stress sobre os operados quando das situações de contingência.

1.6 Objetivo da dissertação

O objetivo deste trabalho é apresentar uma técnica computacional para encontrar a melhor seqüência de recomposição de sistemas elétricos de subtransmissão, utilizando-se Algoritmo Genético, baseado em um índice de prioridade das barras do sistema, bem como regras definidas em IO's de sentido de energização das linhas, que deve ser obedecido.

Ao final do trabalho, espera-se que o leitor adquira uma visão global dos conceitos de operação e recomposição de sistemas, bem como da utilização da técnica de otimização de AG aplicado à recomposição.

1.7 Estrutura da dissertação

Esta dissertação possui seis capítulos e as descrições de cada um deles seguem abaixo:

No capítulo 1 é apresentada uma introdução sobre a operação de sistemas elétricos no Brasil, destacando-se a organização deste setor, é apresentado o papel do ONS no SIN. São descritas as tecnologias para operação e controle dos sistemas, com ênfase aos SSC's (Sistemas de Supervisão e Controle). Neste capítulo também é discutido, com relação ao problema dos blecautes, filosofia da recomposição, e técnicas computacionais que podem ser utilizadas. São ressaltadas as dificuldades encontradas na operação e recomposição, e dada importância a necessidade de desenvolver mais ferramentas para auxílio aos operadores.

No capítulo 2 é realizada uma breve revisão bibliográfica sobre o problema da recomposição e as técnicas computacionais utilizadas na recomposição de sistemas elétricos, é apresentada literatura a respeito do tema, com destaque a utilização de algoritmos de otimização voltados à resolução de recomposição.

No capítulo 3 é feita uma breve abordagem da técnica computacional de Algoritmo Genético (AG), apresentando um breve histórico, definições básicas, codificação, parâmetros e critérios utilizados, os operadores adotados, algumas aplicações e modificações.

No capítulo 4 é apresentado o algoritmo computacional proposto. A técnica computacional de AG utilizada tem uma característica importante, que consiste no tratamento de restrições, que são impostas pela arquitetura das linhas do sistema e sentido de energização, selecionando os melhores resultados. O tratamento destas restrições, juntamente com a priorização das cargas a serem energizadas torna esta dissertação um trabalho inédito, sem qualquer precedente conforme pesquisado na literatura.

No capítulo 5 são apresentados e discutidos os resultados das simulações que foram executadas. Foram testados sistemas elétricos reais, comparados os resultados obtidos na técnica desenvolvida com os obtidos através da técnica de busca exaustiva e realizadas considerações.

O capítulo 6 destina-se à apresentação das conclusões finais e de propostas para futuros trabalhos.

CAPÍTULO 2 – TÉCNICAS COMPUTACIONAIS DE AUXILIO A OPERAÇÃO E RECOMPOSIÇÃO DE SISTEMAS

2.1 Introdução

Neste capítulo é apresentada uma relação de trabalhos publicados relacionados ao tema operação e recomposição de sistemas elétricos, além de trabalhos que descrevem algumas ferramentas computacionais que podem ser utilizadas na recomposição.

2.2 Revisão bibliográfica sobre o tema

Em Matsumoto, Sakaguchi, Kafka e Adibi [30] é descrito que a sociedade moderna depende fortemente de um alto nível de confiabilidade dos sistemas elétricos. Neste trabalho relacionado aos sistemas baseados em conhecimento como ajuda operacional a recomposição, é descrito que além de se evitar as falhas, também se devem recompor os sistemas elétricos rapidamente e com segurança quando as falhas ocorrerem.

Desde que os sistemas elétricos e a operação deles tem tornado-se cada vez mais complexos, e há uma deficiência em pessoal técnico especializado, as concessionárias de energia têm cada vez maiores interesse em desenvolver sistemas de auxilio a recomposição computadorizados. Para preencher os requerimentos destes sistemas, muitas pesquisas para melhorar ou automatizar os procedimentos tem sido desenvolvidos nos anos recentes.

Entre as pesquisas desenvolvidas, estão as relacionadas aos sistemas baseados em conhecimento, os quais podem se tornar uma das principais tecnologias para recomposição de sistemas elétricos de potência.

Em [30] são descritos os sistemas baseados no conhecimento aplicados a recomposição e os esforços realizados para rever as técnicas destes com relação aos problemas de recomposição,

são relatados experiências e algumas avaliações de sistemas utilizados. Descrevem-se também as inovações tecnológicas necessárias nos sistemas de supervisão para implantação destes sistemas.

Este artigo também cita os esforços em melhorar as técnicas de recomposição. Em [30] o processo de recomposição foi descrito como um problema de otimização bastante complexo, que se pudesse ser formalizado do ponto de vista matemático, poderia ser descrito como um problema misto não linear de otimização, multi-estágio e multi-objetivo, que possui muitas limitações. Ao contrario dos problemas de estabilidade e fluxo de potência não pode ser formulado analiticamente. As principais limitações são encontradas nos limites de carregamento de linhas, níveis de tensão fora de limites operacionais e instruções operativas.

Em [30] são apresentados três diferentes sistemas baseados em conhecimento que podem ser utilizados na recomposição: método guiado, estratégia de recomposição e programação orientada a objeto. Na Figura 2.1 é demonstrado o método guiado. Este método permite ao operador ativamente participar na recomposição, podendo atuar em todo o processo, independente do tempo. O plano de recomposição e seqüência operacionais pode ser adaptado às mudanças na situação do sistema. Neste método os operadores podem modificar o plano conforme a necessidade que é verificada por eles em razão de mudanças inesperadas ao longo do tempo.

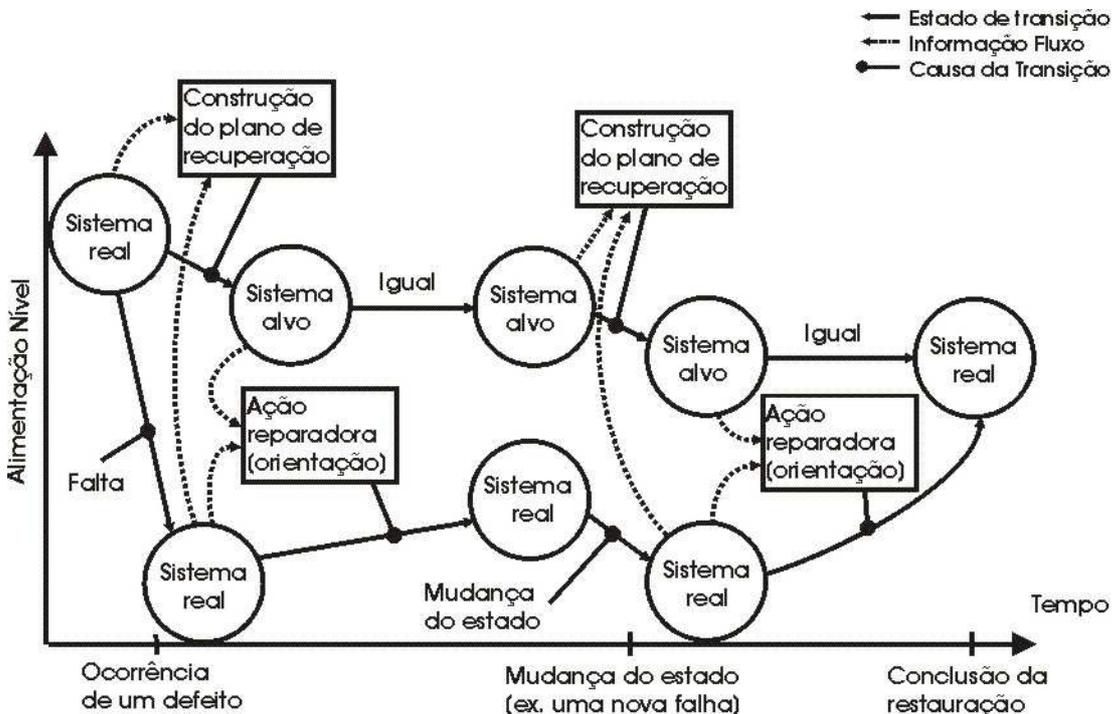


Figura 2.1 – Conceito básico para método de recomposição conforme Método Guiado ao Longo do Tempo [30]

Os desafios e problemas enfrentados pelas empresas de energia elétrica no final dos anos 80 relacionados à operação dos sistemas de suprimento de energia foi chamada a atenção do setor em Nielsen et al [31].

Em [31] cinco breves relatórios foram apresentados, relacionados às áreas problemáticas analisadas pelas forças tarefas do subcomitê de operações de sistemas da IEEE (Instituto de engenheiros eletricitistas e eletrônicos):

- Dois relatórios lidam com os problemas associados à substituição dos EMS e atualização dos componentes ao longo da vida útil destes sistemas. O EMS representa um investimento alto para companhias e costuma ter um ciclo de vida de até 15 anos, ao longo deste período devem ser aplicadas melhorias. Há uma preocupação do subcomitê de que estas melhorias sejam aplicadas sem que cause degradação do funcionamento dos sistemas.
- Um relatório descreve os problemas encontrados em tornar o sistema de alarmes do EMS efetivo e confiável. Os sistemas de alarmes e eventos apresentam falhas e muitas vezes relatam acontecimentos falsos, confundindo os operadores.
- Outro relatório trata do projeto, desenvolvimento e qualidade dos aplicativos utilizados para treinamento de operadores.
- O relatório final lista e descreve os numerosos desafios na recomposição dos sistemas de transmissão após um grande blecaute.

Em Valiquette, Lambert Torres e Mukhedkar [32] é descrito a aplicação de um simulador de operação de redes elétricas de centro de controle, baseado em SE (sistemas especialistas), para treinamento de estudantes de graduação, com a incorporação neste simulador de uma ferramenta de diagnóstico *on-line* e avisos de eventos e alarmes. Neste artigo é destacada a importância da possibilidade da aplicação da IA (Inteligência Artificial). Considerada como uma possível grande melhoria nos sistemas de gestão de energia. Em [32] também cita a aplicação de microcomputadores para rodar estes sistemas, que quando da elaboração do artigo em 1991 eram praticamente não utilizados.

Em Adibi, Kafta [33] são descritos alguns dos problemas encontrados nas três fases principais da recomposição de sistemas elétricos:

- a) Planejamento para reinício e reintegração das fontes de energia;

- b) Ações tomadas durante a degradação do sistema para proteger as fontes de energia na recomposição, evitando rejeição de carga;
- c) Finalização da recomposição quando o sistema de potência encontra-se estabilizado num nível degradado.

Na fase de planejamento, os problemas podem ser encontrados primeiramente nas simulações e análise *offline*. Durante a fase de degradação, os problemas relacionados ao controle precisam de uma solução em tempo real. Na fase de finalização da recomposição os problemas podem estar relacionados às simulações executadas online e apresentação, em relatório, destes resultados para execução de comandos por parte dos operadores.

Em [33] o treinamento dos operadores nas técnicas de recomposição é definido como de alta prioridade, especialmente desde que é rara a oportunidade que os operadores têm de experimentar um blecaute e usá-lo como uma experiência de treinamento. Neste caso o simulador é uma ferramenta efetiva para prepará-los tecnicamente.

Em [33] considera que um SE baseado em conhecimento pode ser considerado importante não apenas para recomposição, bem também um auxílio para operação automática de sistemas. Enquanto isto é prudente que as companhias desenvolvam planos de recomposição detalhados para estudos e análise de aplicabilidade. Os planos de recomposição testados e analisados devem ser flexíveis para garantir que funcionem mesmo após alterações no sistema. Durante o desenvolvimento dos planos, deve ficar claro que novas instalações, como usinas e subestações, poderão ser incluídas nos planos de forma ágil.

Em 1991 Huang, Galiana e Voung [34] apresentaram uma nova metodologia para o planejamento da recomposição, incorporando gráficos interativos e algoritmo de otimização. Os gráficos interativos disponibilizam uma ferramenta para definir os diferentes cenários, observar o processo de recomposição e apresentar os resultados da otimização e simulações.

A partir da introdução do conceito de cenário ótimo de recomposição [34], o processo de selecionar as variáveis de controle pode ser formulado como um problema matemático, o qual pode ser resolvido a partir de programação não linear. Esta aproximação remove a maior parte do conhecimento empírico encontrado no planejamento da recomposição tradicional, disponibilizando uma solução sistemática e ótima no sentido de minimizar as variações anormais, bem como o número de ajustes das variáveis de controle de estágio a estágio.

O processo de otimização reduz a duração dos procedimentos de recomposição e garante a segurança de todas as variáveis durante o processo, respeitando todas as limitações inerentes à operação do sistema [34].

A integração de grandes sistemas SCADA/EMS com o SE é descrito em Ebert et al.[35], para recomposição de sistemas e diagnóstico de falhas. Desenvolvido pela empresa Alemã Siemens , conforme descrito em [35], o sistema de recomposição baseado em SE dá assistência para os operadores em qualquer tipo de blecaute a partir da apresentação de um plano de recomposição. No caso de qualquer quantidade de barras ficarem desligadas, o sistema determina automaticamente a área afetada, e assim, a magnitude do blecaute.

A recomposição do sistema é realizada em fases dependendo do tipo de blecaute, e é baseado no plano estratégico da concessionária. Dentro deste cenário, um plano detalhado é determinado dinamicamente, baseado na situação atual e algumas pré-definições, tais como: prioridade das cargas e usinas a serem ligadas prioritariamente [35].

O sistema descrito em [35] cobre todos os casos de blecautes através da avaliação de planos baseado em casos individuais. O SE é um sistema híbrido utilizando fluxo de potência ótimo também, e é totalmente integrado ao SCADA/EMS. O plano de recomposição para cada fase é apresentado através de uma IHM (Interface homem máquina) comum ao operador e supervisionado durante sua execução.

O sistema cooperativo distingue os desvios desejados dos não desejados pelo operador durante a execução da recomposição [35], assim o operador pode ou não continuar a seqüência de recomposição proposta.

É proposto um sistema de IA distribuído, para auxílio a recomposição de sistemas de potência em Higashi S., Sartor A., Rabelo R. [36]. Com enfoque na operação dentro da nova estrutura do setor elétrico brasileiro, durante a fase coordenada, visando à interligação de áreas geoeletricas formadas após ilhamento do sistema. Sendo prevista uma tomada adicional de carga durante esta fase.

É apresentado um trabalho, com método desenvolvido baseado na busca tabu e busca tabu reativa, proposto para otimização da recomposição de sistemas elétricos de subtransmissão, Matos A. Leite L. Pinto J. [37].

A metodologia é baseada na busca Tabu e Tabu reativa [37]. Onde elementos similares aos encontrados em outros métodos de otimização com algoritmo evolucionário, como: elitismo, aleatoriedade e análise futura, foram utilizados para melhorar o mecanismo de diversificação e

intensificação para a otimização, melhorando as características de memória (lista Tabu), encontrada no método tradicional, permitindo uma melhor sistematização da ferramenta. Assim foi desenvolvida uma característica adaptativa para a busca Tabu tradicional.

Em [37] descreve também uma importante diferença entre a recomposição de sistemas de transmissão comparado a sistemas de distribuição. Neste trabalho é citada característica sequencial da recomposição de sistemas de transmissão, enquanto que os sistemas de distribuição têm uma característica mais combinatória. A metodologia foi aplicada na recomposição de sistemas de subtransmissão de 138 kV.

O seqüenciamento de chaveamento, energização de linha ou barra, integrado a um SE com a utilização de AG é proposto em Siqing al. [38]. Neste caso o SE trabalha em conjunto com o AG na preparação dos dados que consiste na coleta de informações de alarmes, diagnóstico de elementos do sistema elétrico em falha, busca de áreas que estão em blecaute e os caminhos para energização.

A função do AG em [38] é a de ser responsável pela reconstrução das áreas em blecautes, sendo que cada área é subdividida em áreas menores, possibilitando a energização através de diferentes caminhos, possibilitando um ou mais esquemas de energização. A estrutura do sistema de recomposição é apresentada na Figura 2.2, onde o SE funcionando no centro do sistema recebe os dados em tempo real, comunica com uma base histórica, mostrada a esquerda, e uma base dinâmica, mostrada a direita. A base de dados dinâmica é a responsável pela apresentação das informações aos operadores.

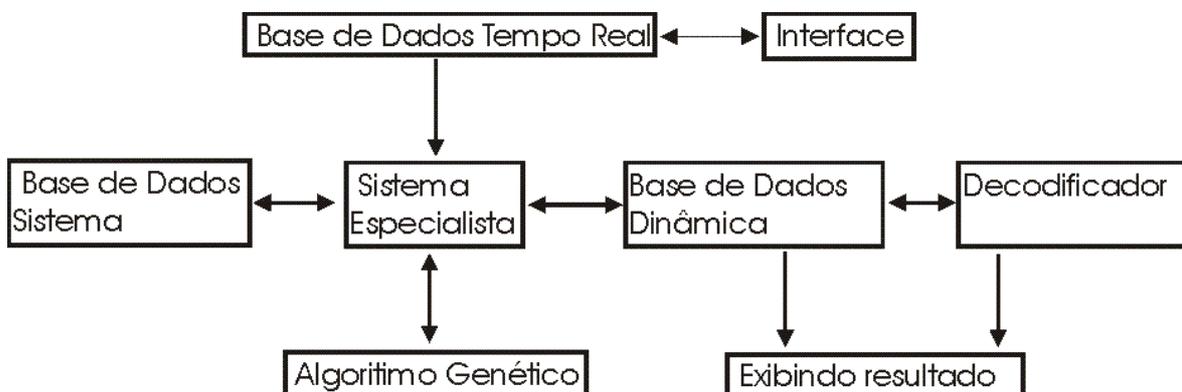


Figura 2.2 – Estrutura do sistema proposto de integração de SE com AG [38]

Foi proposto um aplicativo baseado em AG em Kumar Y. Das B. Sharma J. [39] para resolver o problema de recomposição do sistema elétrico de distribuição com consumidores considerados prioritários. No AG novas soluções são encontradas em cada nova geração, com uma determinada probabilidade de obter uma solução melhor até que a solução considerada ótima não seja encontrada.

Neste trabalho, ao invés de utilizar os operadores tradicionais de cruzamento e mutação, é utilizado o esquema de permutação integral. Na permutação integral, após a geração da prole, os indivíduos que irão para o cruzamento são obtidos com ajuda de um operador classificador específico.

A permutação integral [39] impede que determinados indivíduos na solução do problema permaneçam presos em mínimos locais. O algoritmo desenvolvido permite cálculo de fluxo de potência, controle de chaves manuais e automáticas, recomposição parcial da rede de distribuição, consideração de bancos de capacitor para controle de tensão e a presença de consumidores prioritários na rede.

Um algoritmo de busca que não usa o espaço dos estados das chaves ou disjuntores do sistema, e sim o espaço dos estados dos setores da rede de distribuição, ligados ou desligados foi proposto por Delbem, Bretas e Carvalho [40]. Setores são considerados trechos da rede entre chaves. Como o espaço dos estados dos setores é menor que o espaço dos estados das chaves, o tempo de processamento é significativamente reduzido.

Em [40] é demonstrada a natureza combinatória da recomposição de sistemas de distribuição, onde há uma quantidade maior de chaves para serem manobradas em comparação aos de transmissão, onde normalmente as interligações operam sempre fechadas mantendo os sistemas em anel.

Nas redes de distribuição, há chaves normalmente abertas nas extremidades dos circuitos, que quando manobradas permitem o atendimento a carga por outra direção, alimentador ou subestação, que não a normalmente utilizada.

Neste artigo é descrito que o procedimento para gerar os vetores de solução factível através de heurísticas é uma busca em profundidade que pode otimizar localmente o plano de restabelecimento de energia, mas em geral não atinge a solução ótima [40]. Além disso, a função objetivo para problemas de reconfiguração é uma função não linear e não contínua. Por conseguinte, parte dos vetores factíveis não pode ser gerada pelos algoritmos baseados em heurísticas.

Diante desses problemas, alguns algoritmos para restabelecimento de energia usando AG foram propostos por outros autores citados neste artigo [40]. Isto pelo fato de serem capazes de gerar novas configurações do sistema não dependentes de características peculiares de cada sistema. Esses métodos são capazes de tratar de funções objetivo não linear e não contínuas inerentes a reconfiguração de sistemas de distribuição.

Como demonstrado em [40], o AG pode obter um restabelecimento de energia considerado ótimo. Porém, para sistemas grandes, o algoritmo é lento em razão das operações genéticas de cruzamento e mutação, este é um dos motivos pelo quais nos AG a definição correta destes parâmetros serem tão importante. Neste artigo o principal objetivo é o de simplificar o sistema a ser estudado para melhorar o tempo de obtenção do resultado.

A estratégia de busca heurística equipada com regras práticas, baseadas na experiência do operador, para resolver problemas como serviço de restauração e reconfiguração de sistemas radiais foi apresentado por Morelato A. Monticelli A.[41]. Para resolver tais problemas, os autores usam um processo de busca heurística em árvore de decisão binária que permite percorrer o espaço de possibilidades do estado do sistema. O conhecimento de domínio específico de cada sistema é essencial para limitar o tamanho da árvore de decisão.

Outro sistema híbrido para resolver o problema da recomposição utilizando SE e AG foi desenvolvido em Fukuyama, Endo e Nakanishi [42], sendo aplicável em sistemas de distribuição com resultados promissores, analisando inclusive os aspectos de restrições operativas e técnicas.

Em [42] o SE determina de forma localizada a operação das chaves para expandir a margem de suprimento das fontes quando a potência total disponível não é suficiente para atender todo o sistema. A potência total da vizinhança da região sem energia pode não ser suficiente para restaurar todo o sistema, neste caso o SE executa o chaveamento conhecido como multi-estágio [42]. Trata-se de um grande problema combinatório, onde chaves NA (Normalmente aberta) são fechadas. As NF (Normalmente fechada) são abertas nos circuitos no intuito de realocar a energia proveniente das fontes vizinhas de forma que não ocorra qualquer sobrecarga no sistema.

O AG em [42] realiza a decomposição global da área sem energia através de manobra de chaves, transformando cada uma em áreas parciais ligadas a suas respectivas fontes, permitindo um contrabalanceamento de cada uma das fontes de suprimento em relação às áreas sem energia.

O artigo apresentado em [42] aplica-se em sistemas elétricos de distribuição em razão da utilização de chaves NA interligando os diferentes circuitos, e NF ao longo dos alimentadores, caracterizando-o como um problema combinatório.

CAPÍTULO 3 - ALGORITMOS GENÉTICOS (AG)

3.1 Introdução

As aplicações da IA vão muito além dos objetivos iniciais que, por volta da década de 1950, visavam reproduzir o pensamento humano. Foi quando Alan M. Turing [43] propôs um teste simples para identificar quando o comportamento de uma máquina poderia ser considerado inteligente.

Além da reprodução da inteligência humana, técnicas de IA têm sido incorporadas a aplicações tão distintas quanto o reconhecimento automático dos caracteres da placa de um carro ou a lógica de controle de uma máquina de lavar roupas. A utilização da IA permite não somente ganhos significativos de performance, através da “inteligentificação” de máquinas e sistemas, mas também possibilita o desenvolvimento de aplicações inovadoras, capazes de expandir de forma extraordinária nossos sentidos e habilidades intelectuais. É o caso, por exemplo, dos programas de busca na internet ou dos corretores ortográficos e gramaticais automáticos. Em outras palavras, o desenvolvimento e a aplicação de algoritmos capazes de reproduzir habilidades inteligentes, e não necessariamente da inteligência como um todo, provavelmente resultarão em avanços tão expressivos quanto foram o uso do vapor no início da revolução industrial ou a introdução do computador a partir da Segunda Guerra Mundial [44].

Neste capítulo é realizada uma descrição mais detalhada dos AG, o qual é a técnica de IA utilizada neste trabalho. São apresentadas suas características, mecanismos de funcionamento, codificação e operadores utilizados.

3.2 Descrição do AG

Dentre as diversas técnicas matemáticas de IA, como Redes Neurais [45] e Lógica Nebulosa [46], os AG's formam a parte da área dos sistemas inspirados na natureza, simulando os processos naturais e aplicando-os à solução de problemas reais. AG são métodos generalizados de busca e otimização que simulam os processos naturais de evolução, aplicando a idéia Darwiniana de seleção [47]. De acordo com a aptidão e a combinação com os operadores genéticos, são produzidos métodos de grande robustez e aplicabilidade.

Estes algoritmos codificam uma possível solução de um problema como um cromossomo, composto por uma cadeia de bits ou caracteres [48]. Os cromossomos representam indivíduos reunidos em uma população, que são levados ao longo de varias gerações, na forma similar aos problemas naturais. Evoluindo de acordo com os princípios de seleção natural e sobrevivência dos mais aptos, descritos pela primeira vez por Charles Darwin [47]. Emulando estes processos, os AG's são capazes de melhorar soluções de problemas do mundo real.

Na natureza, os indivíduos competem entre si por recursos como água, alimento e refúgio. Adicionalmente, entre os animais de uma mesma espécie, aqueles que não obtêm êxito tendem provavelmente a ter um número reduzido de descendentes havendo, portanto, menor probabilidade de que seus genes sejam propagados ao longo de sucessivas gerações. A combinação entre os genes dos indivíduos que perduram na espécie pode produzir um novo indivíduo muito melhor adaptado às características de seu meio ambiente.

Os AG's utilizam uma analogia direta deste fenômeno de evolução na natureza, onde cada indivíduo representa uma possível solução para um problema dado. A cada indivíduo se atribui uma pontuação de adaptação, dependendo da resposta dada ao problema por este indivíduo. Aos mais adaptados é dada a oportunidade de reproduzirem-se mediante cruzamentos com outros indivíduos da população, produzindo descendentes com características de ambas as partes. Se um AG for desenvolvido corretamente, a população, conjunto de possíveis respostas, poderá convergir para uma solução próxima da ótima no problema proposto. Embora analogicamente eficiente, como a técnica de seleção natural, por ser probabilístico, o AG não garante que a solução encontrada corresponda à solução ótima.

O importante no AG, é que quando bem aplicado, permite ao programador analisar o processo de convergência da população, analisando os possíveis resultados, se os mesmos atendem a um ponto considerado ótimo, definindo o critério de parada da pesquisa. É possível ao longo do processo de otimização, com a avaliação da função custo, também conhecida como *fitness*, verificar se o espaço de busca está sendo explorado da forma mais abrangente possível.

As técnicas de busca e otimização tradicionais normalmente se iniciam com um único candidato, que pode ser manipulado por técnicas heurísticas ou estatísticas próprias, diretamente associadas ao problema a ser solucionado, exemplo da busca Tabu [37]. Esta é uma das grandes diferenças com relação aos AG's, onde a resolução do problema inicia-se com uma população de candidatos.

Os AG's, como uma das técnicas de computação evolucionária, diferem dos métodos exatos de busca e otimização, principalmente em quatro aspectos:

- a) Trabalham com uma codificação de conjunto de parâmetros;
- b) Trabalham a partir de uma população de soluções e não com uma única solução;
- c) Utilizam informações de custo ou recompensa e não derivadas ou outro conhecimento auxiliar;
- d) Utilizam regras de transição probabilísticas e não determinísticas.

Os Algoritmos Genéticos são métodos heurísticos muito eficientes para busca de soluções, em uma grande variedade de problemas, pois não impõem muitas das limitações encontradas nos métodos de busca tradicionais. Os pesquisadores referem-se a “algoritmos genéticos” ou a “um algoritmo genético” e não “ao algoritmo genético”, pois AG é uma classe de procedimentos com muitos passos distintos, sendo que cada um destes passos possui muitas possíveis variações. Não há apenas uma técnica de AG, cada autor pode adaptar a técnica a solução de seu problema, criando novas variações da metodologia [49].

Resumidamente o método de AG pode ser descrito da seguinte forma: inicialmente, é gerada uma população formada por um conjunto aleatório (ou não) de indivíduos que podem ser vistos como possíveis soluções do problema. Durante o processo evolutivo, esta população é avaliada: para cada indivíduo é atribuído um valor (*fitness*), ou índice, refletindo sua habilidade de adaptação ao determinado ambiente. Os indivíduos mais adaptados ao ambiente recebem uma maior probabilidade de se perpetuarem através de cruzamento com outros indivíduos também mais adaptados, característica esta conhecida como elitismo. Os membros mantidos também podem sofrer modificações em suas características fundamentais através de mutações, de forma que estatisticamente possam tentar gerar indivíduos ainda melhores. Assim é gerada uma prole, conhecida como nova geração. Este processo é repetido até que uma solução satisfatória seja encontrada, conforme descrito no fluxograma da Figura 3.1.

3.3 Histórico do AG

Nas décadas de 50 e 60, biólogos começaram a desenvolver simulações computacionais baseadas em sistemas genéticos. Foi John Holland quem desenvolveu as primeiras pesquisas no tema, Holland foi gradualmente refinando suas idéias, e em 1975 publicou o seu livro “Adaptation in Natural and Artificial Systems” [50]. Considerado por alguns a Bíblia de AG, muito citado, mas pouquíssimo lido, em grande parte devido ao estilo pesado, com notação pouco criteriosa e excessivamente complexa [51]. Felizmente, Holland e seus muitos discípulos, quase todos seus alunos de pós-graduação, continuaram sua linha de investigação, publicando resultados com alguma timidez, mas com perseverança [52].

Nos anos 80, David Goldberg, aluno de Holland, obteve o primeiro sucesso em uma aplicação industrial de Algoritmos Genéticos [53]. Desde então, estes algoritmos vêm sendo aplicados com sucesso nos mais diversos problemas de otimização, em pesquisas acadêmicas e na área industrial.

3.4 Definições básicas

A seguir, algumas definições básicas sobre Algoritmos Genéticos são consideradas. Elas abrangem aspectos como Codificação, Função de Avaliação, Convergência, Seleção, Reprodução, Operadores Genéticos, Condição de Término e Parâmetros (tanto para seleção quanto para reprodução). O mecanismo de um AG é simples de ser implementado computacionalmente. É repetitivo e circular, até que a solução desejada seja obtida, conforme descrito no fluxograma da Figura 3.1. Nele considera-se que foi definida uma população inicial de possíveis soluções para o problema, função objetivo ou *fitness* é avaliada para cada geração, em seguida são aplicados os operadores genéticos e testada a condição de parada.

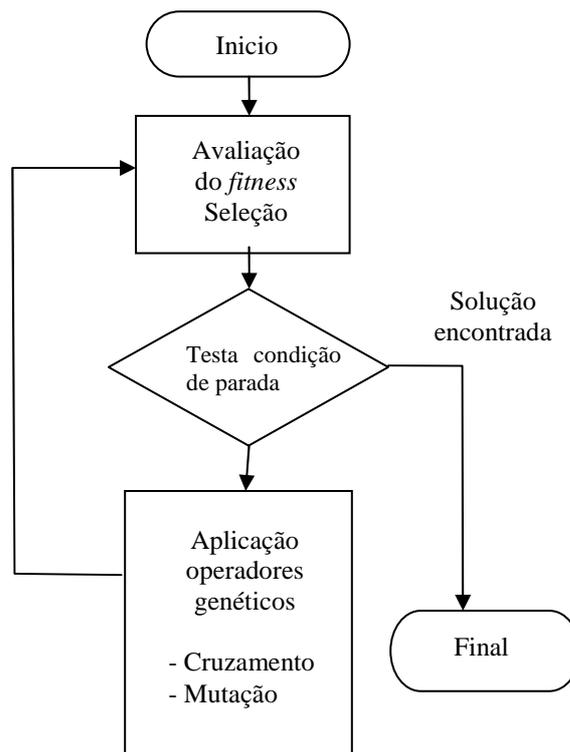


Figura 3.1 – Fluxograma Básico de um AG

3.4.1 Codificação

As partes que relacionam um AG com um problema dado são a codificação e a função de avaliação. O primeiro passo para aplicação de AG's a um problema, é representar cada possível solução no espaço de busca como uma seqüência de símbolos (cromossomo) gerados a partir de um alfabeto finito A . No caso mais simples usa-se o alfabeto binário, ou seja, $A=\{0,1\}$, mas, no caso geral, tanto o método de representação quanto o alfabeto genético dependem das características do problema.

Em termos de AG's, o cromossomo corresponde ao indivíduo, e este é representado por uma seqüência de genes de comprimento finito, como mostra a Figura 3.2. Cada gene tem seu próprio valor. Uma determinada seqüência de genes também pode ser chamada de *string*. O termo alelo refere-se a um valor dentro do conjunto de valores possíveis de ser atribuído a um determinado gene, ou seja, é um valor (0 ou 1 no caso mais simples).

Na terminologia própria à Biologia, ao conjunto de cromossomo, genes e alelos denominam-se genótipo e às características conferidas por estes, denomina-se fenótipo. No contexto dos AG's, o genótipo é a variável independente x da função objetivo $f(x)$, e o fenótipo é a

variável dependente ou o valor da função $f(x)$. Um resumo comparativo entre a terminologia utilizada em AG's e na Biologia é apresentada na Tabela 3.1 e os conceitos mencionados são ilustrados na Figura 3.3.

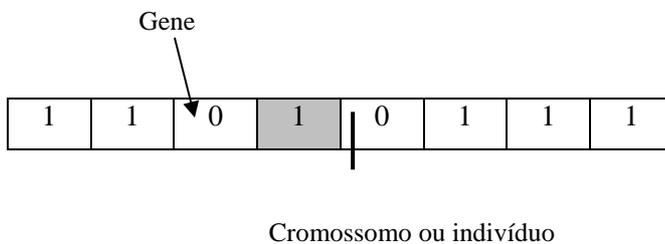
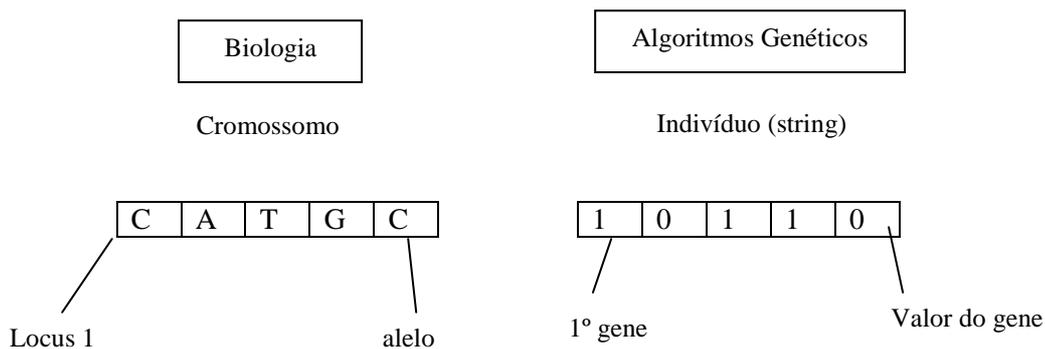


Figura 3.2 - Representação do Cromossomo

Tabela 3.1 – Resumo comparativo entre terminologias

<i>Biologia</i>	<i>Algoritmos Genéticos</i>
Cromossomo	Indivíduo ou string
Gene	Gene ou bit (no caso binário)
Alelo	Valor do gene, ou do bit (no caso binário)
Locus	Posição de um gene no indivíduo
Genótipo	Indivíduo candidato à solução x
Fenótipo	Valor da função $f(x)$ para um dado indivíduo



$$\text{Genótipo} = 1 \cdot 2^4 + 0 \cdot 2^3 + 1 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 0 \cdot 2^0 = 22$$

$$\text{Fenótipo} = \text{valor de } f(22)$$

Figura 3.3 – Comparativo entre os diferentes conceitos

3.4.2 Função de avaliação (função *fitness*) ou objetivo

Dado um cromossomo, a função de avaliação consiste em associar um valor numérico de adaptação ou *fitness*, no qual se supõe que é proporcional a utilidade ou habilidade do indivíduo representado. Em muitos casos, o desenvolvimento de uma função de avaliação deve levar em conta a complexidade do problema. A função será aplicada a cada indivíduo de cada população e as sucessivas gerações assim se devem procurar utilizar pouco tempo computacional, de forma a não comprometer a solução do problema do AG.

3.4.3 Seleção

A Seleção basicamente tem por objetivo fazer com que os indivíduos mais adaptados da geração anterior tenham maior probabilidade de participarem do processo que irá formar uma nova população. Em geral, geram-se uma população temporária de P indivíduos extraídos com probabilidade proporcional à adaptação relativa (*fitness*) de cada indivíduo na população, ou seja, a probabilidade de seleção de um indivíduo é, em geral, dada pela Equação (3.1).

$$P_{SELX} = \frac{f(x_k)}{\sum_{i=1}^P f(x_i)} \quad (3.1)$$

Na Equação (3.1) $f(x)$ é o valor da função de adaptabilidade (em geral a função objetivo) e x_i e x_k são as soluções candidatas (indivíduos) e i variando de $\{1,2,3,\dots,P\}$. Em problemas de maximização ordenam-se os *fitness* de cada indivíduo de uma população em ordem decrescente. Em problemas de minimização, ordenam-se os *fitness* em ordem crescente. Assim, com base na Equação (3.1) os indivíduos com baixa adaptação (pior *fitness*) terão alta probabilidade de desaparecerem da população, ou seja, serem extintos, ao passo que indivíduos mais adaptados terão grandes chances de sobreviverem. Os indivíduos selecionados são então submetidos a operadores genéticos, tratados a seguir.

3.4.4 Operadores Genéticos

Os operadores genéticos mais conhecidos e utilizados são apresentados a seguir.

a) Cruzamento

O operador genético cruzamento genericamente toma dois indivíduos escolhidos pela seleção, e corta seus cromossomos em uma partição selecionada aleatoriamente, para produzir os segmentos anteriores e os posteriores; os posteriores realizam um intercâmbio para obter dois novos cromossomos. O operador cruzamento busca solução a partir do

conhecimento dos indivíduos já existentes. As Figuras 3.4a, 3.4b e 3.4c apresentam cruzamentos em diferentes lócus de um cromossomo; a quantidade de pontos de cruzamento designa as partições do operador.

O operador cruzamento mais observado nos artigos estudados neste trabalho é o representado na Figura 3.4a, que é o cruzamento simples de uma partição.

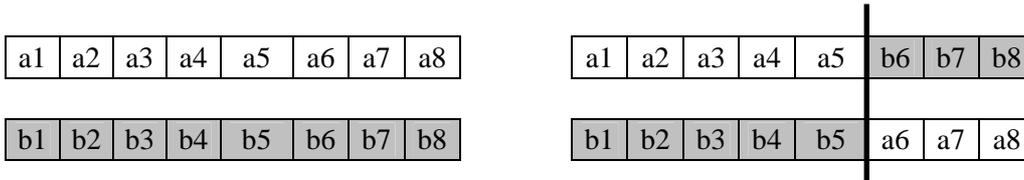


Figura 3.4a – Cruzamento de uma partição

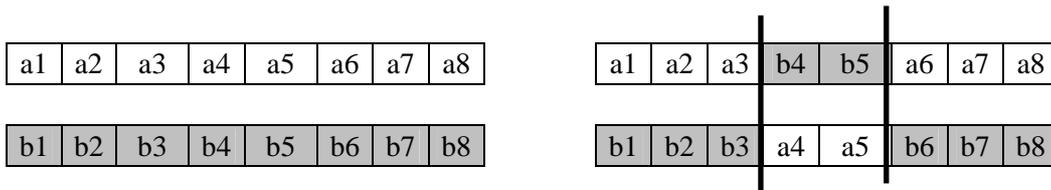


Figura 3.4b – Cruzamento de duas partições

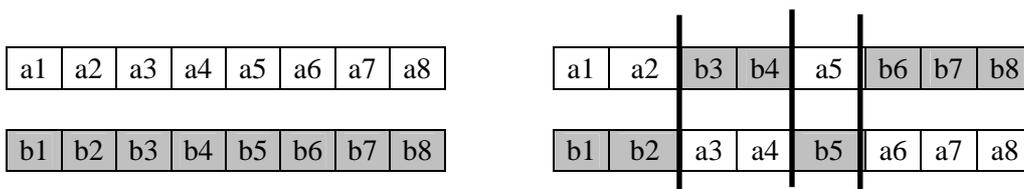


Figura 3.4c – Cruzamento de três partições

b) Mutação

A Mutação é um processo importante no AG, apesar de que está usualmente concebida como um operador cujo papel é secundário. A Mutação é um operador que pode permitir a exploração de novos espaços de busca, produzindo indivíduos com novos traços quando comparado com a geração pai.

No caso binário a mutação consiste em substituir com certa probabilidade (taxa de mutação), o valor de um *string* ou gene, de 0 para 1 ou 1 para 0.

No caso combinatório onde cada gene deve representar um valor diferente a mutação consiste na troca, normalmente aleatória de dois ou mais pontos no cromossomo.

A Figura 3.5a apresenta de forma genérica o operador genético mutação, no exemplo, que não é binário, a posição do gene foi alterada dentro do cromossomo, para um novo lócus.

Gene sorteado para mutação

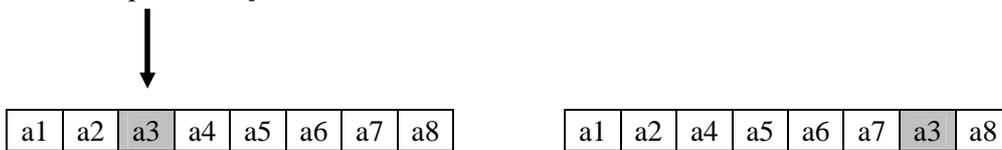


Figura 3.5a – Operador genético mutação

Podem ser destacadas algumas variações no operador genético mutação. Por exemplo, a mutação por inversão é caracterizada pela retirada e inserção de parte da cadeia, porém na ordem inversa em que foi retirada. Já na mutação por translação, parte do cromossomo é retirada e colocada em outra posição, guardando a ordem com a qual foi retirada. A hipermutação é uma operação onde se realiza mutação em todos os *strings* possíveis, avaliando-se em qual deles é melhor que se estabeleça a inserção de material genético diferenciado. A Figura 3.5b apresenta o operador genético hipermutação, a Figura 3.5c o esquema da mutação por inversão e a Figura 3.5d o esquema da mutação por translação.

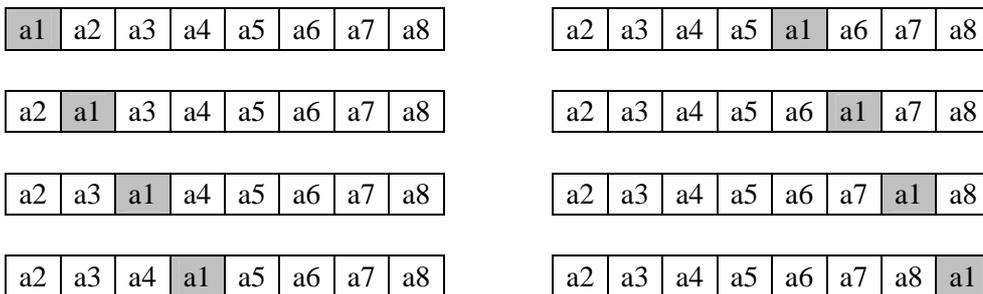


Figura 3.5b – Operador genético hipermutação

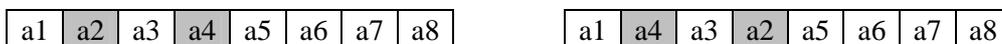


Figura 3.5c – Esquema da mutação por inversão



Figura 3.5d – Esquema da mutação por translação

3.4.5 Condição de parada

Como estamos tratando de problemas de otimização, o ideal seria que o algoritmo terminasse assim que o ponto ótimo fosse descoberto. O AG, como qualquer metaheurística, é um processo de busca que não pode garantir que chega no ótimo global, porque não testa todas as possíveis soluções do problema.

Como consequência, normalmente usa-se o critério do número máximo de gerações ou um tempo limite de processamento para parar a execução do processo do AG. Outro critério utilizado é o de parar o algoritmo usando a idéia de estagnação, ou seja, quando não se observa uma determinada melhoria da população depois de várias gerações consecutivas.

O critério do número máximo de gerações é mais simples de ser implementada, no próprio algoritmo esta variável pode ser facilmente alterada. O critério de estagnação exige um conhecimento muito bom do espaço de busca a ser analisado, bem como uma programação matemática mais complexa.

Para se avaliar a estagnação, um método que pode ser utilizado é comparar o desvio padrão dos valores de adaptação dos indivíduos da população atual com os valores de adaptação dos indivíduos da população anterior.

3.4.6 Parâmetros dos operadores genéticos

Para que os Algoritmos Genéticos tenham desempenho satisfatório quando aplicados à solução de um problema, dentre outros aspectos, é importante levar em consideração fatores que possam influenciar a performance dos operadores genéticos, os quais são os apresentados a seguir.

a) Tamanho da população

O tamanho da população afeta o desempenho global e a eficiência dos AG's. Uma população pequena oferece uma pequena cobertura do espaço de busca, causando uma queda no desempenho. Uma grande população fornece uma melhor cobertura do domínio do problema e previne a convergência prematura para soluções locais. Entretanto, com uma grande população tornam-se necessários recursos computacionais maiores, ou um tempo

maior de processamento. A escolha do tamanho da população depende do caso a ser otimizado e da programação matemática adotada.

b) Taxa de cruzamento

Quanto maior for esta taxa, mais rapidamente novas estruturas serão introduzidas na população. Entretanto, isto pode gerar um efeito indesejado, pois a maior parte da população será substituída podendo ocorrer perda de indivíduos de alta aptidão. Com um valor baixo, o algoritmo pode tornar-se muito lento. Mais uma vez, a taxa de cruzamento a ser adotada depende de cada problema a ser analisado.

c) Taxa de mutação

Uma taxa de mutação bem definida previne que uma dada posição fique estagnada em um valor, além de possibilitar que se alcancem outros pontos do espaço de busca. Com uma taxa de mutação muito alta, a busca se torna essencialmente aleatória. Por este motivo, é muito importante o papel do tomador de decisões que deverá escolher uma taxa de mutação adequada a cada problema apresentado.

3.4.7 Critérios de seleção

Se um AG for devidamente implementado, a população evoluirá ao longo de sucessivas gerações, convergirá para um ponto considerado ótimo. A convergência poderá ser uma progressão uniforme ou não, dependendo do problema a ser analisado e da forma como o mesmo foi modelado. Durante a convergência pode ser notado o fenômeno *schema* que é um modelo de representação para uma família de cromossomos que possuem seus alelos semelhantes [50]. Este fenômeno, também conhecido como *schemata* é amplamente discutido na literatura, com várias formas de ser resolvido, facilitando a seleção dos melhores indivíduos. A similaridade dos cromossomos ao longo de várias gerações tem sido objeto de estudos.

O ponto de partida para a utilização de AG's, como ferramenta para solução de problemas, é a representação destes problemas de maneira que os AG's possam trabalhar adequadamente sobre eles. Tradicionalmente, os indivíduos são representados genotipicamente por vetores binários, onde cada elemento de um vetor denota a presença (1) ou ausência (0) de uma determinada característica: o seu genótipo. Os elementos podem ser combinados formando as características reais do indivíduo, ou o seu fenótipo. O critério de Seleção é um dos princípios básicos de funcionamento dos Algoritmos Genéticos. O critério de seleção é que vai fazer com que, depois de muitas gerações, o conjunto inicial de indivíduos gere indivíduos mais aptos. São apresentados a seguir, dois dos critérios de seleção, que são mais utilizados.

a) Roleta Simples

Um método de seleção muito utilizado é o método de roleta simples, onde indivíduos de uma geração são escolhidos para fazer parte da próxima geração, através de um sorteio. Cada indivíduo tem probabilidade de ser sorteado proporcionalmente à sua adaptação. Um exemplo simplificado é apresentado na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Dados exemplo para a técnica da roleta

<i>Indivíduos</i>	<i>Adaptação</i>	<i>Porcentagem do total (%)</i>
X4	201	91
X2	10	5
X3	7	3
X1	2	1
TOTAL	220	100

A roleta simples causa alta pressão sobre os indivíduos da população, pois o indivíduo mais adaptado no exemplo da Tabela 3.2 terá uma relação de 91:1 de ser sorteado (selecionado para sobrevivência e reprodução), em relação ao menos adaptado. A pressão seletiva está implicitamente relacionada com a diversidade da população. Alta pressão seletiva tende a fazer a diversidade cair rapidamente, levando a população a convergir em poucas gerações, o que pode resultar em convergência prematura [53].

b) Ordenação (Ranking)

A técnica de ranking também apresenta os indivíduos ordenados conforme adaptação de cada indivíduo. Contudo, no ranking, cada indivíduo recebe uma nota, sendo que o menos adaptado recebe 1 e o mais adaptado fica com nota igual ao tamanho da população (distância de 1 a cada vizinho). Nesse método, a probabilidade de um indivíduo ser selecionado depende exclusivamente do seu ranking e não do valor de sua adaptabilidade. A Tabela 3.3 apresenta os dados de 4 indivíduos ordenados para seleção segundo o critério de seu ranking.

Tabela 3.3 – Dados exemplo para a técnica de ranking

<i>Indivíduos</i>	<i>Adaptação</i>	<i>Distância (%)</i>
X4	201	40
X3	10	30
X2	7	20
X1	2	10
TOTAL	220	100

Pode-se estabelecer um comparativo entre os dois critérios de seleção citados anteriormente. Os gráficos das Figuras de gráfico de setor 3.6a e 3.6b comparam o critério de seleção Roleta Simples e Ranking com base nos dados das Tabelas 3.2 e 3.3. Nota-se nas Figuras a diferença da probabilidade de X4 ser selecionado no método da roleta simples e no método do ranking.

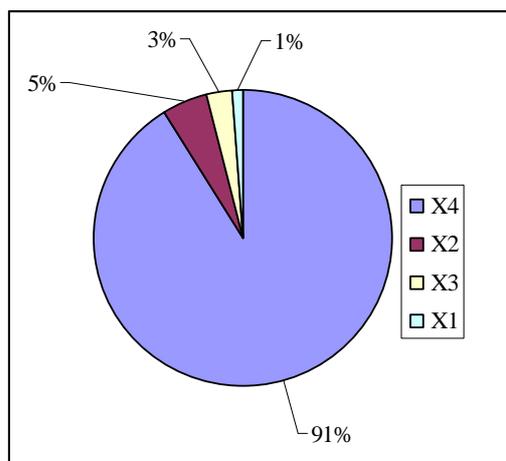


Figura 3.6a – Gráfico critério da roleta simples

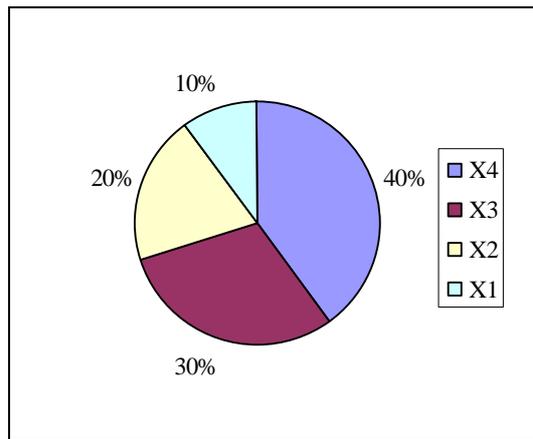


Figura 3.6b – Gráfico critério do ranking

Na literatura pesquisada é mais encontrado o método da roleta simples. Cada indivíduo da prole tem uma probabilidade de ser selecionado proporcional à sua aptidão. Para visualizar este método considere um círculo dividido em n regiões (tamanho da população), onde a área de cada região é proporcional à aptidão do indivíduo, quanto maior a aptidão, maior a área utilizada na roleta, conforme representado na Figura 3.7, onde 6 indivíduos possuem diferentes *fitness*. Os indivíduos proporcionalmente mais aptos ocuparão maior espaço na roleta, teoricamente terão assim maior probabilidade de serem escolhidos no sorteio da roleta.

Este método é também denominado amostragem universal estocástica ou seleção proporcional ao *fitness*. Evidentemente, os indivíduos cujas regiões possuem maior área, terão maior probabilidade de serem selecionados repetidas vezes. Como consequência, a seleção de indivíduos pode conter várias cópias de um mesmo indivíduo enquanto outros podem desaparecer. Isto explica o aspecto da alta pressão seletiva neste método.

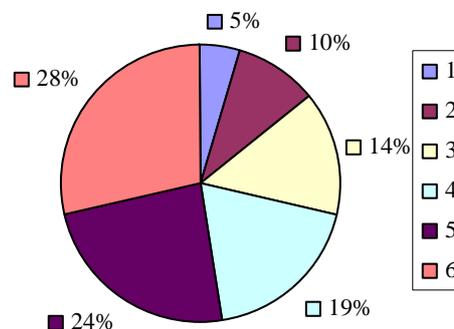


Figura 3.7 – Exemplificação do método da roleta simples

3.5 Outros tipos de AG

Até o presente momento todos os fundamentos apresentados basearam-se na nos AG'S da forma mais simples. Existem outros tipos de algoritmos genéticos que foram desenvolvidos para problemas mais específicos.

3.5.1 Genitor

Genitor [54] é um algoritmo cujos melhores pontos encontrados são preservados na população. Este procedimento é denominado de elitismo. Na prática isto resulta numa busca mais agressiva, que na prática é geralmente bastante efetiva. No entanto existe o perigo de uma convergência prematura para mínimos locais. A prole resultante dos indivíduos selecionados em uma determinada geração (n) substitui os piores indivíduos da população analisada na geração anterior (n-1). O processo de seleção e cruzamento é repetido, propiciando a transmissão das melhores aptidões para as gerações subseqüentes.

3.5.2 CHC – Cruzamento a partir da seleção elitista, recombinação heterogênea e mutação cataclísmica

Outro AG que coleciona os melhores indivíduos da população atual é o CHC [55]. Após o cruzamento, feito aleatoriamente, os “n” melhores indivíduos são coletados levando-se em consideração a população atual e a população gerada após o cruzamento. Removem-se os indivíduos duplicados. Este método impõe uma busca mais agressiva, assim como no Genitor. Repare que a seleção está implícita no algoritmo, a partir do momento que escolhe os melhores indivíduos de cada população (anterior e atual). Normalmente usam-se populações pequenas, com 50 indivíduos, por exemplo. O ponto de cruzamento é sempre a metade do cromossomo. Para se solucionar o problema de convergência prematura para mínimos locais é utilizada uma alta taxa de mutação, sempre preservando o melhor indivíduo da população. A partir da primeira seleção aleatória, utiliza-se o cruzamento diretamente nas populações subseqüentes.

3.5.3 Algoritmos híbridos

Muitos autores consideram que os AG's nem sempre são a melhor solução para problemas de otimização específicos. Desta forma, os algoritmos híbridos utilizam os AG's como ponto de partida para métodos de otimização tradicionais, como o *Simulated Annealing* [56], método de *Powell*, entre outros. A desvantagem destes algoritmos é a introdução de um *overhead* computacional devido à busca baseada em populações, característica dos AG's. A mistura das técnicas tradicionais com os AG's introduz uma espécie de aprendizado no AG, pois os

cromossomos utilizados foram resultado da técnica denominada *hill-climbing*, utilizada nos métodos de otimização tradicionais que utilizam derivadas [57].

CAPÍTULO 4 – CODIFICAÇÃO DO PROBLEMA DE RECOMPOSIÇÃO DE SISTEMAS UTILIZANDO AG

4.1 Introdução

Este capítulo descreve o processo adotado para solução do problema do seqüenciamento ótimo da recomposição de sistemas de subtransmissão, utilizando a técnica de otimização de AG, com as devidas adaptações.

Para os testes do algoritmo proposto foi utilizada a ferramenta computacional Matlab [58], onde foram realizados todos os testes computacionais. O algoritmo foi desenvolvido dentro do conjunto de programas denominado EXPERT [59]. O EXPERT é resultado do projeto de Pesquisa e Desenvolvimento intitulado Sistema Especialista para auxílio na tomada de decisões para recomposição em tempo real [60], desenvolvido pela equipe de pesquisadores do Laboratório de Inteligência Artificial do Departamento de Engenharia Elétrica da UFMS, em conjunto com a concessionária de energia elétrica ENERSUL, responsável pela distribuição ao estado de Mato Grosso do Sul.

O EXPERT engloba também a técnica de busca exaustiva, com o objetivo de encontrar a melhor seqüência de recomposição de sistemas elétricos baseado em prioridade, restrição de sentido de energização e fluxo de potência. A técnica de busca exaustiva, utilizando os mesmos casos, serviu como *benchmark* para comparação da técnica desenvolvida de AG.

O programa computacional desenvolvido ao longo do trabalho representa o resultado prático desta dissertação, isto é, um algoritmo computacional que pode ser adaptado dentro de outros SE, SCADA ou EMS. Os resultados dos testes efetuados são apresentados no capítulo 5.

4.2 Descrição geral

O objetivo principal do trabalho é o de apresentar um algoritmo computacional de auxílio a recomposição de sistemas elétricos de subtransmissão. A resposta do problema esperada é uma seqüência ótima de recomposição de energização das linhas de um determinado sistema, baseado na prioridade das cargas e regras constante nas IO's.

Problemas de encontrar o melhor caminho ou seqüência, também são conhecidos como problema do caixeiro viajante, estes consistem basicamente em encontrar o menor caminho entre "n" pontos diferentes. Eles podem ser resolvidos com diversas técnicas de busca e otimização, tais como: busca exaustiva, árvore de decisão, busca Tabu, AG entre outras técnicas.

O AG aplicado neste caso constitui-se numa importante ferramenta de otimização, apresenta as vantagens descritas no capítulo anterior, apresenta grandes desafios relacionados a modelagem e determinação da função custo.

O algoritmo desenvolvido pode servir para auxiliar os operadores durante a recomposição de sistemas elétricos, bem como ser utilizado como um simulador com propósito de treinamento.

Os dados de entrada utilizados no aplicativo são os descritos na Tabela 4.1, através de uma matriz gerada dentro do aplicativo EXPERT.

Tabela 4.1 – Parâmetros da matriz de entrada de dados Kb

<i>Componente</i>	<i>Parâmetros</i>
Barras (bus)	Nome, Posição, P, Q, V, $V\theta$ e índice de prioridade.
Linhas (line)	Barra Inicial (<i>busf</i>), Barra final (<i>bust</i>), número de circuitos paralelos, capacidade de carregamento, Impedância elétrica.
Geradores (gen)	Nome, barra, Pmax, Qmax, posição, status.
Regras (rule)	Relação dos sentidos de energização não permitidos pelas IO's.
Barra de sincronização	Número da barra <i>swing</i> do sistema.

Na aplicabilidade do plano de recomposição resultante através da busca com AG, não foi analisado a questão do fluxo de potência devido o elevado tempo computacional necessário para tal.

A saída do aplicativo é considerada a melhor seqüência de recomposição da rede elétrica, para atender as cargas mais prioritárias. Cada subestação recebe dos operadores um índice de prioridade de energização, que pode caracterizar a importância desta subestação em todo o sistema.

O funcionamento do aplicativo é apresentado sucintamente na Figura 4.1. Dentro do EXPERT há um aplicativo GUI (Interface gráfica do usuário), apropriado para modelagem do sistema elétrico a ser recomposto, onde são desenhadas as linhas e barras e inseridos os parâmetros da rede. Como resultado é obtido um arquivo extensão “.MAT”, onde os dados estarão armazenados na matriz Kb. Este arquivo é lido pelo módulo RECOMPOR [59], parte do conjunto de programas EXPERT, onde se escolhe didaticamente a forma de processamento do problema, se será passo a passo, manual linha após linha, ou automática, onde é realizada toda a seqüência de energização das linhas.

O algoritmo desenvolvido propriamente dito foi dividido em 2 módulos distintos: 1 módulo denominado de “GA”, onde é gerada a população inicial, inseridos os parâmetros utilizados na técnica, e executada os operadores de seleção, cruzamento e mutação; e outro módulo, chamada de “fcusto”, que é o responsável pela elitização dos indivíduos, escolhendo os melhores em relação a uma determinada função custo. O código dos módulos “GA” e “fcusto” são apresentados no Anexo A.

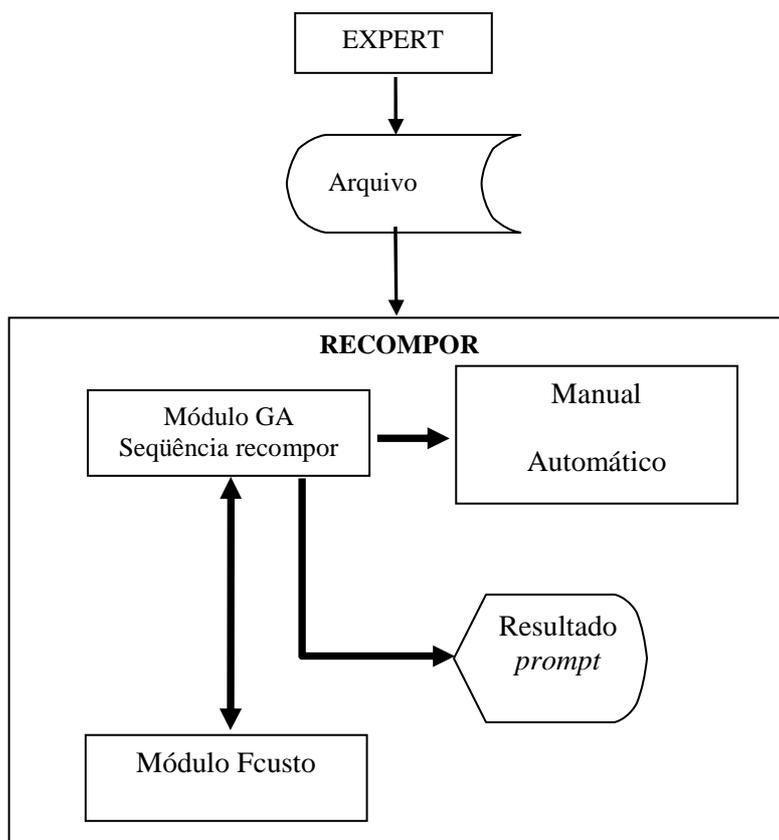


Figura 4.1 – Diagrama de blocos do aplicativo desenvolvido

4.3 Codificação do problema

Os problemas de otimização de AG são baseados em três aspectos principais: a codificação do problema; a função objetivo que se deseja maximizar ou minimizar; e o espaço de soluções associado, conhecido como espaço de busca.

A codificação consiste em representar um conjunto de dados, matemáticos ou não, neste caso os parâmetros do sistema elétrico, em um conjunto de vetores, denominados cromossomos, que possam ser resolvidos pelo AG.

O desenvolvimento da função objetivo consiste em obter uma métrica, capaz de associar o resultado obtido no problema a um determinado valor, que represente o grau de utilidade desse resultado quando comparado a uma resposta considerada ótima.

O espaço de soluções possíveis representa um conjunto finito de vetores, cromossomos, onde cada um é candidato em potencial a ser a solução ótima, comparado a métrica da função objetivo. O ideal em problemas de otimização é que todas as soluções possíveis pudessem ser corretamente avaliadas, a grande questão trata-se da dimensão deste espaço. No exemplo descrito a seguir, um sistema pequeno, com 4 barras e 5 linhas, nota-se que as soluções candidatas ultrapassam o número 100, em sistemas maiores as soluções ultrapassam milhões de possibilidades.

Como forma de demonstrar os aspectos principais da codificação do problema de otimização do AG, é demonstrado na Figura 4.2 um caso exemplo com 4 barras, 1 linha dupla e 4 linhas simples. Neste exemplo é considerada a barra b1 como gerador ou fonte; e as barras b2, b3 e b4 como carga, denominada c2, c3 e c4.

Neste exemplo, a prioridade de energização das barras é dada na Tabela 4.2, e há uma restrição de IO. O sentido de energização sempre é de b1 para b2, b2 para b1 só pode ser ligado se b1 estiver energizada.

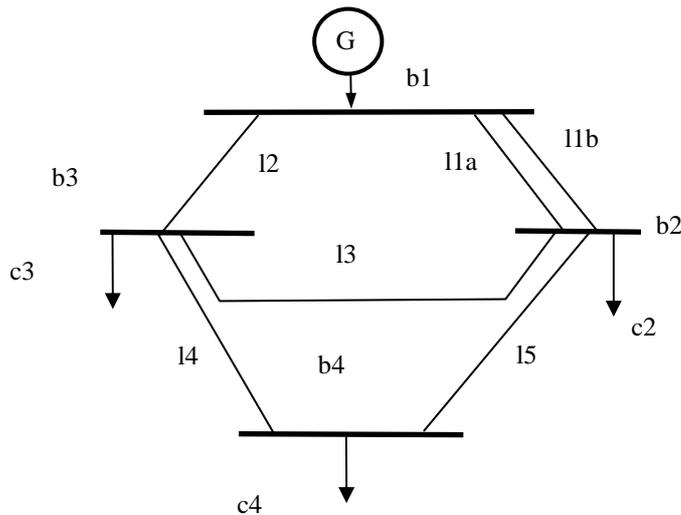


Figura 4.2 – Exemplo

Tabela 4.2 – Prioridades do exemplo demonstrado na Figura 4.2

<i>Barra</i>	<i>Índice de prioridade (%)</i>
b1	50,0
b2	75,0
b3	50,0
b4	50,0

A matriz de entrada dos dados, gerada pelo módulo EXPERT, depois de desenhado o sistema a ser analisado, demonstrada na Tabela 4.1. Nesta matriz denominada Kb ficam armazenados todos os parâmetros necessários para o cálculo da melhor seqüência de recomposição. Se for desejado o algoritmo permite obter também o fluxo de potência.

Os dados de entrada utilizados para o módulo GA são:

- Nro_pop: quantidade de população inicial conforme sistema a ser analisado;
- Probcruza: Probabilidade de cruzamento dos cromossomos em percentual;
- Probmuta: Probabilidade de mutação dos cromossomos em percentual;
- GeracaoMax: Quantidade máxima de gerações para análise do AG.

Cada cromossomo corresponde a uma determinada solução possível do problema de recomposição, que é uma dada seqüência de energização de linhas, no exemplo da Figura 4.2, o cromossomo [12, 11, 15, 13, 14] corresponderia a uma possível solução, onde a 1ª linha energizada seria a 12 e a última energizada seria a 14. Cada gene do cromossomo corresponde a uma linha. Para este problema os circuitos com mais de 1 linha em paralelo, conhecidos como circuitos duplos, foram considerados como apenas 1 linha.

Se analisarmos o problema de recomposição como uma árvore de decisão em uma busca exaustiva, o exemplo da Figura 5.2, com 5 linhas, representa 5!, ou 120 soluções, ou cromossomos possíveis de serem analisados.

4.3.1 População inicial

A população inicial do problema é um conjunto de cromossomos gerados de forma aleatória. O comprimento do cromossomo corresponde a quantidade de linhas do sistema. Para geração da população inicial não é utilizada uma semente.

4.3.2 Função objetivo

A função objetivo é processada no módulo computacional fcusto. Os dois módulos conversam entre si de forma interativa para resolução deste problema.

O módulo fcusto, baseado em determinadas regras, ou notas, apresentadas nos parágrafos seguintes, determina uma pontuação, ou um preço para cada um dos cromossomos da população. As notas são baseadas na prioridade das barras do sistema e regras de IO. A Figura 4.3 mostra uma matriz gerada a partir do exemplo da Figura 4.2, neste exemplo o parâmetro Nro_pop é igual a 5, com 5 linhas ou genes. Na Figura 4.4 mostra um vetor resultado com o custo calculado para cada cromossomo desta geração. No exemplo em questão nota-se que o cromossomo 2 representa a melhor solução, com maior valor resultado da função custo.

Indivíduos (linhas)

Ind.1	13	14	15	11	12
Ind.2	11	15	14	13	12
.	15	13	12	11	14
.	12	11	14	13	15
Ind n	14	13	12	15	11

} Num População

Figura 4.3 – Matriz de indivíduos exemplo

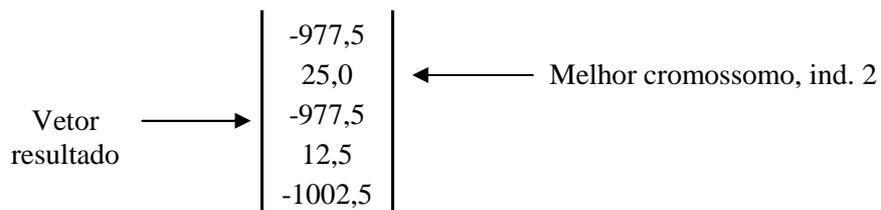


Figura 4.4 – Vetor resultado do exemplo

A Figura 4.5 exemplifica a evolução do AG em encontrar a melhor solução para o problema de otimização. O módulo fcusto trabalha em conjunto com o GA de maneira interativa. Os operadores genéticos de seleção, cruzamento e mutação ficam no módulo GA.

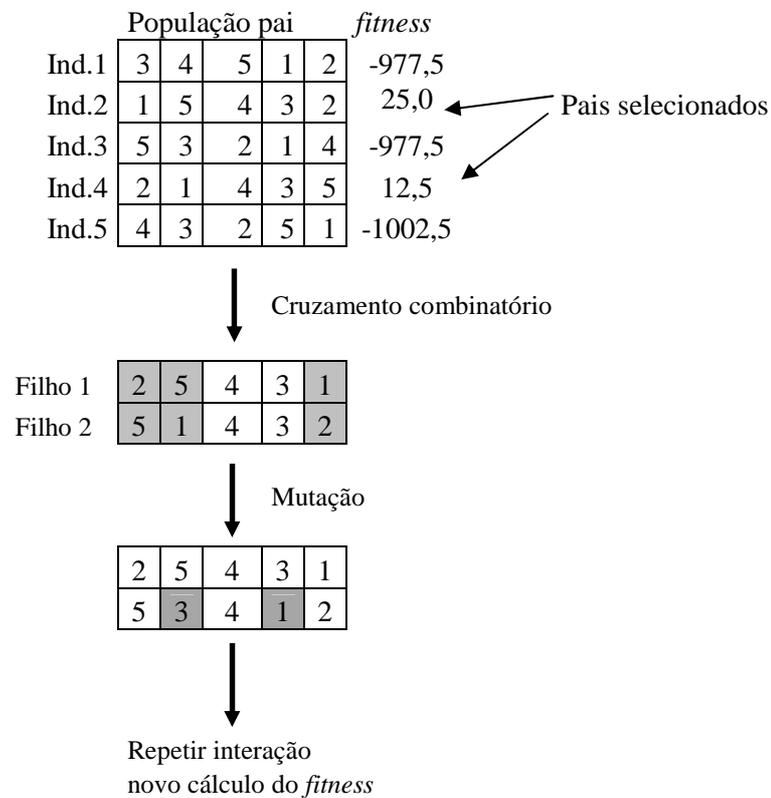


Figura 4.5 – Evolução do AG, caso exemplo

O resultado do *fitness* é obtido no módulo fcusto a partir de 2 notas que são consideradas pela função objetivo:

a) Nota 1

Trata-se da soma das prioridades das barras associadas às linhas do sistema em cada possível solução. A solução é multiplicada por um vetor variando entre $\{+1,0$ a $-1,0\}$, conforme Figura 4.6, que modifica o peso relativo do 1º gene até o último gene “n” do

cromossomo. Tem como objetivo melhorar relativamente o *fitness* das soluções consideradas boas, aquelas onde as barras com as maiores prioridades são recompostas o mais rápido possível.

Este recurso também conhecido como *fitness scaling* [53], facilita a seleção quando o valor médio da função objetivo da população inteira é muito próximo ao melhor *fitness* encontrado.

$$f' = af + b \quad (4.1)$$

Na Equação (4.1) f' é o novo *fitness* e f é o *fitness* inicial. Os parâmetros a e b podem ser definidos de diversas formas, conforme o problema a ser estudado.

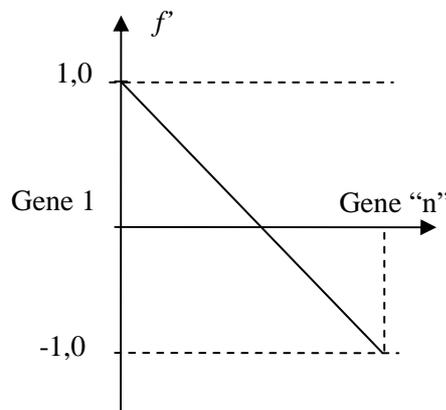


Figura 4.6 – *Fitness scaling* utilizado, Equação (4.1)

A nota 1 é utilizada para penalizar os piores cromossomos, e melhorar relativamente a nota, ou preço, dos indivíduos que tenham as melhores prioridades.

Observando o exemplo da Figura 4.2, um possível cromossomo solução 1 (b1, b3, b4, b2), com os pesos ou prioridades respectivamente (50, 50, 50, 75) teria a principio a mesma nota que um cromossomo solução 2 (b1,b2,b3,b4), que é (50, 75, 50, 50), olhando do primeiro ao último gene. Aplicando a ponderação conforme a Figura 4.6, obtém nota 1:

- Solução 1 – $(50*1.0, 50*0.3, 75*0.0, 50*-0.3, 75*-1.0) = -25.0$
- Solução 2 – $(50*1.0, 75*0.3, 50*0.0, 50*-0.3, 50*-1.0) = 7.5$

Portanto a solução 2, onde a barra b2 deve ser energizada antes da b3, recebe pelo método um peso ou *fitness* maior.

Obedecendo a direção em que o sistema está sendo energizado, a nota 1 é calculada conforme a Equação (4.2):

$$Nota\ 1 = nota\ 1_{(n-1)} + Kb.bust.pri * ponderar\ (Y) \quad (4.2)$$

Na Equação (4.2), *Kb.bust.pri* é a prioridade associada as barras seguintes na recomposição, e o índice *Y* representa a posição do gene no cromossomo, sendo que o multiplicador *ponderar* varia ao longo do cromossomo de +1 a -1.

Desta maneira, do primeiro gene até o último do cromossomo, é aplicado um determinado peso. Os cromossomos, possíveis soluções, que tiverem suas maiores prioridades no final da seqüência de recomposição, terão as piores notas. Enquanto que os cromossomos, onde as maiores prioridades estiverem no início da seqüência de recomposição, receberão as maiores ponderações, conforme a função da Figura 4.6, conseqüentemente terá as melhores notas.

Assim é privilegiada a seqüência de recomposição que atenda as cargas mais prioritárias, o mais rápido possível.

b) Nota 2

Representa o sentido de energização das linhas obedecendo as IO's. É aplicada uma forte penalização, quando o sentido de energização das linhas não esteja sendo respeitado, também conhecida no algoritmo como restrição ONS. Não é obrigatória de ser utilizada.

$$fit(Nota\ 2) = fit(m-1) - restr * 1000 \quad (4.3)$$

Na Equação (4.3) a variável *restr*, que representa o sentido de energização das linhas, e é multiplicada por -1.000, para na variável *fit* poder fazer valer o sentido obrigatório de energização das linhas, conforme definido nas IO's.

A Equação (4.4) determina como é calculado o valor do *fitness* de cada solução encontrada.

$$fit = nota1 + nota2 \quad (4.4)$$

O valor *fit* é obtido no módulo *fcusto*. O algoritmo computacional de análise da função objetivo permite a inclusão de outras notas que forem consideradas necessárias, como análise de carregamento de linhas e fluxo de potência.

c) Avaliação das restrições

Um dos grandes problemas encontrados para modelagem deste problema de AG, relacionado à recomposição, trata-se das limitações relativas às conexões das linhas de transmissão, ou a arquitetura do sistema elétrico. Esta restrição acaba limitando bastante o espaço de busca a ser estudado, e se não for corretamente avaliada produz no AG muitas soluções candidatas que não são factíveis, causando perda da performance, e atraso na obtenção da melhor solução.

Tal problema foi notado em sistemas onde há muitas linhas radiais e que a geração ou fonte do sistema, onde é iniciada a recomposição, fica distante das principais cargas, conforme estudo de caso número 3 apresentado no capítulo 5. Neste caso a barra fonte de JUP encontra-se distante em relação às subestações da região de Campo Grande. Na modelagem há uma barra intermediária, chamada de MIM.

Para possibilitar maior controle de soluções candidatas, o algoritmo permite um controle da análise das restrições (*restr*), conforme exemplo da Figura 4.7. Não obstante, esta alteração possibilitou um melhor tratamento do problema de restrições em sistemas com linhas radiais, acelerando a resolução da recomposição.

Ind.2	11	15	14	13	12
-------	----	----	----	----	----

Avaliação das restrições

Figura 4.7 – Exemplo limitação das restrições para as 2 primeiras linhas do cromossomo

Após avaliação do custo das soluções encontradas, o resultado é retornado ao módulo computacional GA, para aplicação dos operadores genéticos de forma interativa.

Resultado final:

$$function(\textit{fit}, \textit{ons}, \textit{restr}) = \textit{fcusto}(\textit{mat}, \textit{kbin}) \quad (4.5)$$

Na Equação (4.5) *fcusto* realimenta com as informações de custo o módulo GA, através das variáveis *fit*, *ons* e *restr*.

O vetor resultado e a matriz indivíduos são retornados ao módulo GA para execução dos operadores genéticos.

4.3.3 Funcionamento dos operadores genéticos

a) Seleção

Foi utilizado o método da roleta simples. Os melhores cromossomos receberão maior pontuação e conseqüentemente terão maior probabilidade de serem selecionados.

$$ProbRoleta(i) = resultado(i) / somatório(resultado) \quad (4.6)$$

$$Roleta(i) = soma acumulada (ProbRoleta) \quad (4.7)$$

Na Equação (4.6) a probabilidade da roleta de cada cromossomo é calculada de maneira proporcional entre o resultado individual e a soma dos resultados.

Na Equação (4.7) a roleta definida na seleção é a soma acumulada das probabilidades de sucesso de cada um dos cromossomos.

b) Cruzamento

O cruzamento ou *crossover* é tratado de forma combinatorial, diferentemente do cruzamento demonstrado no capítulo 3, item 3.4.4, as partes dos cromossomos pais não podem ser diretamente intercambiadas, haveria assim o problema de repetição de genes, que é proibido neste caso. No algoritmo desenvolvido o cruzamento é realizado conforme uma determinada probabilidade, sendo que uma parte do cromossomo dos pais é mantida, e os demais genes são trocados, para que na prole não ocorra repetição de genes, conforme demonstrado na Figura 4.5. A probabilidade de cruzamento utilizada nos testes foi sempre mantida acima de 50%. No algoritmo a quantidade de indivíduos resultantes na prole, após o cruzamento, é igual a quantidade de indivíduos pais.

c) Mutação

A mutação é realizada a cada geração, conforme uma probabilidade pré-determinada. Exemplo se for adotada probabilidade de 2%, e o sistema conter 10 cromossomos com 10 genes cada, haverá mutação em 2 genes sempre do mesmo cromossomo. A probabilidade de mutação utilizada nos testes foi sempre mantida entre 1 a 4%.

d) Critério de parada

O critério de parada adotado no algoritmo é do máximo número de gerações. A solução candidata com maior *fitness* é separada e mantida ao longo de todo o problema, enquanto uma solução melhor não a substituir. Embora seja um método que consuma um tempo computacional maior, optou-se por este critério devido a sua praticidade.

4.4 Interface gráfica utilizada

O aplicativo utilizado possui interface gráfica apropriada para entrada dos dados, bem como desenho do sistema a ser analisado na recomposição. Nas Figuras 4.8 e 4.9 são mostradas as telas do EXPERT para parametrização do sistema elétrico. Pode-se graficamente desenhar as linhas e barras digitando os parâmetros, bem como as regras de sentido de energização das linhas. Através de menus e botões, a interface GUI possibilita a inserção de informações, edição e eliminação. O pesquisador/operador pode também escolher quais informações deseja visualizar referente ao sistema em estudo. Os 3 componentes principais: barras, linhas e geradores são mostrados separados. Há um campo específico para inserção, edição e eliminação das regras de IO's.

A interface gráfica desenvolvida, embora seja bastante interessante, é mais apropriada para trabalhos de pesquisa acadêmica. Para aplicação comercial, é necessário transportar o código desenvolvido para outros aplicativos mais apropriados.

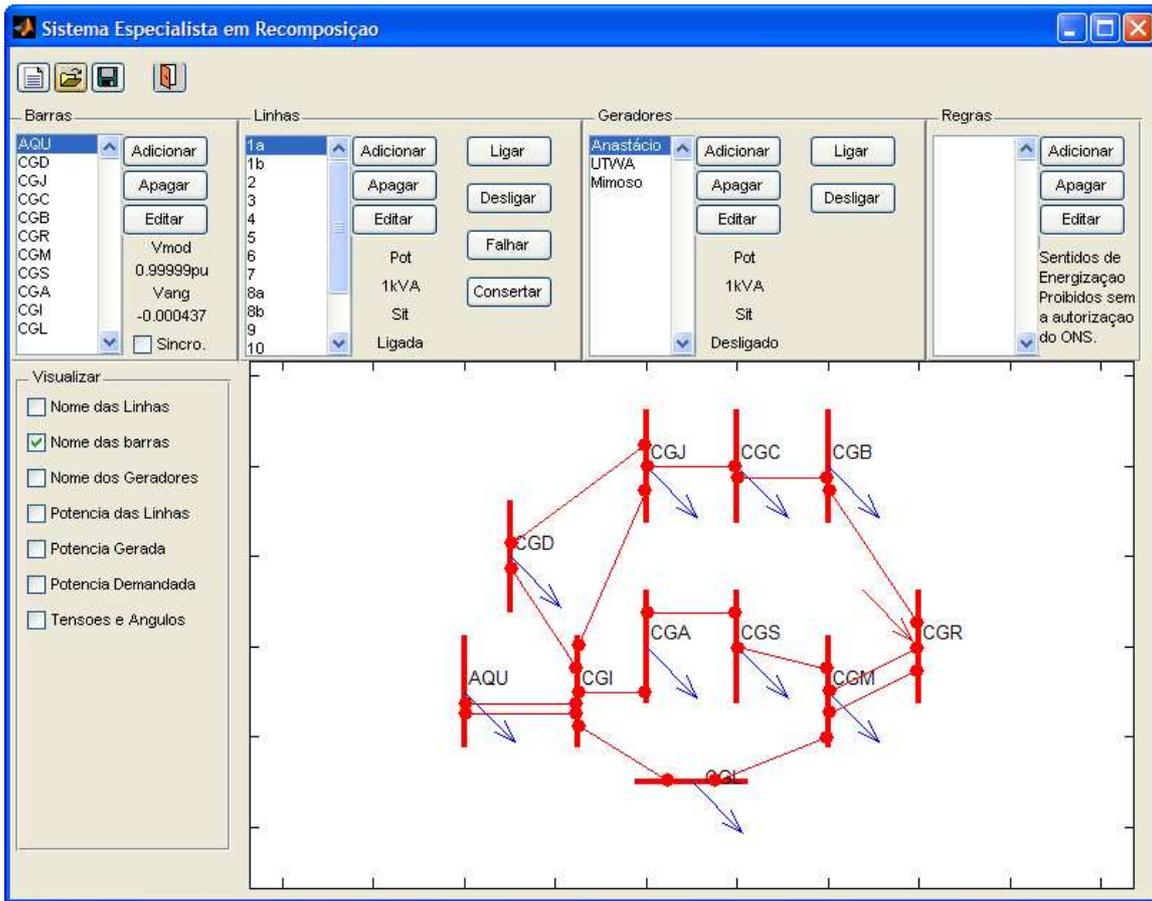


Figura 4.8 – Tela gráfica de entrada de dados programa EXPERT

Na Figura 4.9 são apresentadas as telas específicas para inserção e edição dos parâmetros das barras e linhas, indicando posição da barra, da conexão da linha na barra, posição vertical ou horizontal. Na tela de edição de linhas, além de indicar os parâmetros, também é indicado a barra de origem e destino da linha e o ponto onde a linha se conecta em cada barra.

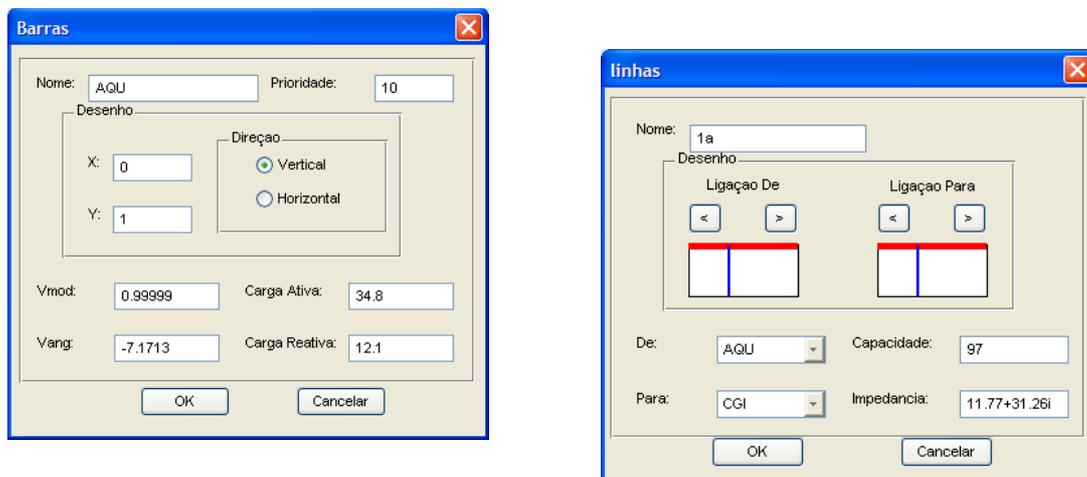


Figura 4.9 – Continuação das telas gráficas de entrada de dados programa EXPERT

O aplicativo RECOMPOR é mostrado na Figura 4.10. A partir de menus é possível escolher o tipo de Recomposição a ser utilizada: manual ou automática. Bem como o método de recomposição: busca exaustiva ou AG. Nesta tela é possível visualizar os nomes das linhas e barras, os parâmetros elétricos, resultados do cálculo de fluxo de potência, prioridades e se as linhas estão ligadas ou desligadas. Os resultados são visualizados interativamente conforme a recomposição esta sendo executada, ou em numeradores que são apresentados junto as linhas indicando qual a prioridade de energização, pode-se assim acompanhar a evolução do processo de recomposição. No Anexo B é possível visualizar telas exemplo com resultados de seqüenciamento da recomposição do sistema.

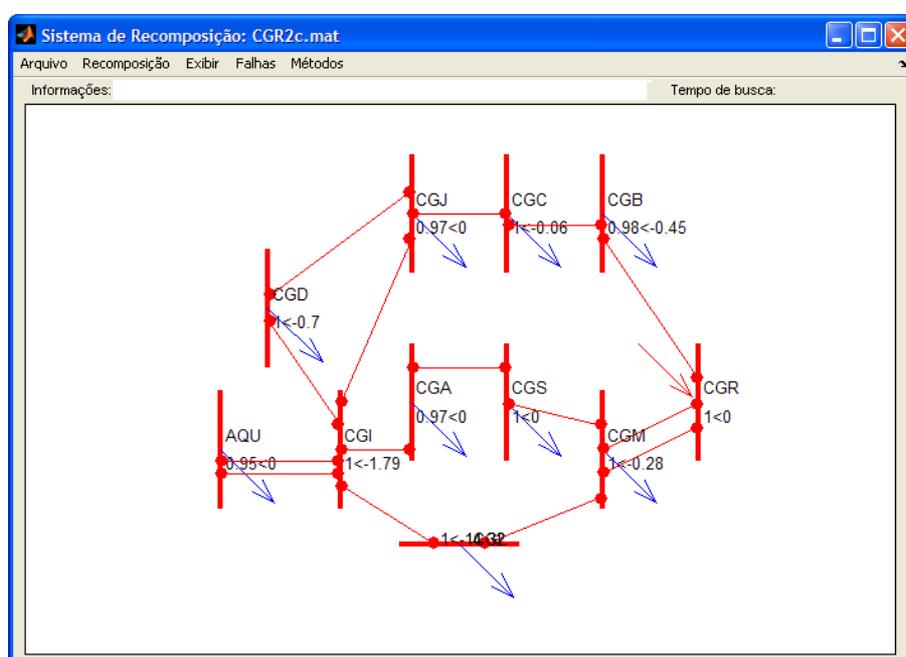


Figura 4.10 – Telas gráficas aplicativo RECOMPOR

CAPÍTULO 5 - RESULTADOS OBTIDOS

5.1 Introdução

Neste capítulo são mostrados alguns estudos de casos, utilizando o algoritmo proposto. Foram utilizados três sistemas elétricos de subtransmissão em 138 kV, nos dois sistemas maiores foram feitos testes com recomposição total ou parcial. Os casos são estudados do menor para o maior sistema. O principal parâmetro utilizado como balizador para a recomposição foi o índice de prioridade das barras.

O índice de prioridade é definido pelos especialistas da operação do sistema, e normalmente representaria o quão importante é a energização da barra para a concessionária. No caso da ENERSUL, cada alimentador de distribuição recebe um determinado índice de prioridade pelo COD (Centro de Operação da Distribuição) conforme as cargas alimentadas por este, se são hospitais, áreas comerciais, prédios públicos, etc. Neste algoritmo a prioridade da barra foi considerada o somatório das prioridades dos alimentadores, e não há restrição se 2 ou mais barras utilizam o mesmo índice.

O índice de prioridade no caso 2 foi modificado no intuito principal de analisar mudança na seqüência recomendada no resultado obtido, se o mesmo era condizente com a ordem de prioridade das barras, ou seja, confirmando se o objetivo do algoritmo AG de busca estava sendo plenamente satisfeito.

Todos os resultados obtidos pelo AG foram comparados com a técnica de busca exaustiva (BE). Como a BE faz uma análise de todo o espaço de busca, o resultado obtido nesta técnica foi considerado como *benchmark*. Exemplo do código computacional da BE utilizada encontra-se no Anexo A.

Os dois últimos sistemas estudados fazem parte da recomposição fluente, obedecendo a procedimentos do ONS [19], isto possibilitou uma comparação melhor com casos reais observados no COS da companhia responsável pelo atendimento a região.

Foram feitas sintonização dos parâmetros do AG: taxa de cruzamento; mutação; número de gerações máximas e população inicial, de forma a ajustar o AG, permitindo a obtenção de resultados iguais ao *Benchmark*.

Os testes do algoritmo foram realizados em 3 casos: exemplo 5 linhas, semelhante ao apresentado no capítulo 4; exemplo região de Campo Grande 138 kV, denominado sistema 2; e um exemplo maior, partindo da usina de Jupiá até a subestação de Corumbá, passando pela região de Campo Grande, denominado sistema 3.

As regiões estudadas nos casos 2 e 3 possuem em torno de 200.000 consumidores de energia, e no horário de carga pesada apresentam demandas de energia da ordem de 300MW.

As prioridades das barras dos sistemas são apresentadas nos próprios diagramas. No estudo de caso 2 foram realizadas 2 simulações, alterando-se os índices de prioridades entre as subestações para poder constatar mudança na seqüência de recomposição.

Foram aplicadas algumas restrições de IO, representando o sentido de energização obrigatório das linhas.

Os casos foram simulados após a desenergização parcial ou total de toda a área de estudo. Todas as linhas são abertas, o próximo passo é o de adotar um ponto inicial para energização, uma barra fonte. A seqüência resultante apresentada pelo algoritmo deve ser aquela onde as cargas mais prioritárias sejam atendidas o mais rápido possível.

5.2 Resultado dos testes

5.2.1 Estudo de caso 1 – Exemplo 4 barras

O sistema 1 é composto de 4 barras e 5 linhas, conforme Figura 5.1, a prioridade adotada é indicada em (%) para cada barra. Para este sistema foi estudada a recomposição após blecaute total, desligando todas as linhas. Foi considerada a barra b1 como barra inicial para energização.

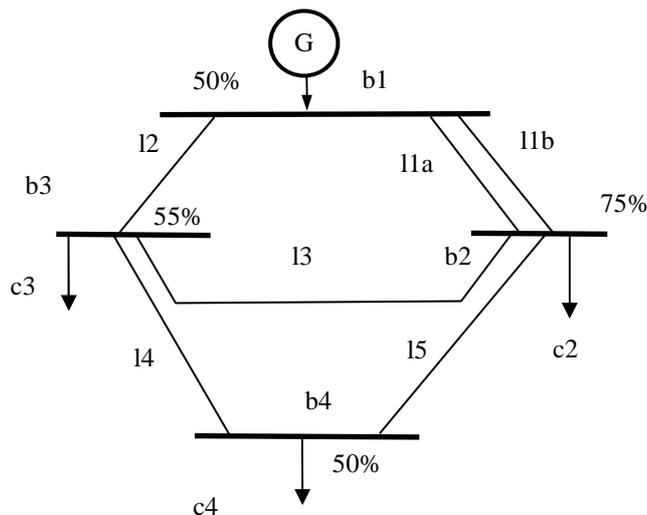


Figura 5.1 - Diagrama unifilar exemplo 1

Na tabela 5.1 são apresentados os resultados para o caso 1, as primeiras 4 linhas da Tabela, representam os resultados obtidos pela BE, considerados *benchmark* comparativo, assim também ocorreu nas demais Tabelas resultado deste capítulo.

Tabela 5.1 – Resultado caso 1 - exemplo

<i>Seqüência de energização ótima</i>	[11,13,12,14,15]
<i>Valor de fitness solução ótima</i>	37,50
<i>Tempo BE</i>	0,28 s
<i>Dimensão total espaço de busca</i>	120 combinações
<i>Tamanho da população AG</i>	10
<i>Taxa de cruzamento</i>	50%
<i>Taxa de mutação</i>	4%
<i>Número gerações mínima para encontrar a solução</i>	50
<i>Quantidade de soluções analisadas AG</i>	500 possíveis soluções
<i>Tempo AG</i>	1,06 s

Para sistemas menores, como neste caso, nota-se que o espaço de busca para o AG tornou-se muito grande quando comparado com a BE. Bem como o tempo para resolução do problema também foi superior.

5.2.2 Estudo de caso 2 – região de Campo Grande

a) Prioridade normal – recomposição total

O sistema 2 é composto de 9 barras e 8 linhas circuito simples e 2 linhas circuito duplo, conforme representado na Figura 5.2, a prioridade adotada é indicada em (%) para cada barra. Para este sistema foi estudada a recomposição após blecaute total, desligando

todas as linhas, bem como blecaute parcial desligando algumas linhas. Foi considerada a barra CGR como barra inicial da energização.

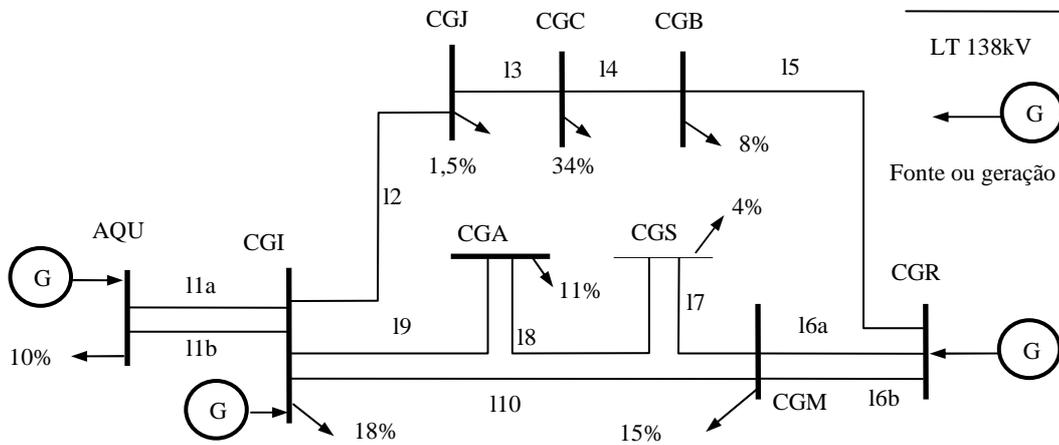


Figura 5.2 - Diagrama unifilar simplificado da região de Campo Grande – estudo de caso 2

Neste caso 2, os resultados tanto da BE como do AG são apresentados na Tabela 5.2, nota-se neste caso, um aumento significativo da dimensão do espaço de busca devido maior possibilidade de conexões, que é 10!.

Tabela 5.2 – Resultado caso 2 – região de Campo Grande

<i>Seqüência de energização ótima</i>	[15,14,16ab,110,17,18,19,11 ab,13,12]
<i>Valor de fitness solução ótima</i>	43,78
<i>Tempo BE</i>	86,55 s
<i>Dimensão total espaço de busca</i>	3.628.800 combinações
<i>Tamanho da população AG</i>	100
<i>Taxa de cruzamento</i>	90%
<i>Taxa de mutação</i>	1%
<i>Número gerações mínima para encontrar a solução</i>	1.000
<i>Quantidade de soluções analisadas AG</i>	100.000 possíveis soluções
<i>Tempo AG</i>	83,39

Analisando o caso 2 através da busca AG, a garantia de obter um resultado melhor, comparável com a BE, somente ocorre quando a quantidade de soluções analisadas ultrapassa 100.000 possibilidades, ou aumentando a quantidade de gerações ou o tamanho da população.

Neste caso 2, a quantidade de soluções necessárias para análise por parte do AG, corresponde 2,8% do total de combinações possíveis da BE, sendo que o tempo necessário no AG é um pouco inferior ao tempo necessário para a BE.

b) Prioridade modificada – recomposição total

Definindo nova prioridade das barras, para fins de teste do estudo de caso 2, de acordo com a Tabela 5.3, e mostrado na Figura 5.3, verifica-se alteração na seqüência de energização das barras conforme era o esperado.

Tabela 5.3 - Índice de prioridade de recomposição adotado no estudo de caso 2

<i>Subestação</i>	<i>Índice de prioridade normal (%). Figura 5.2</i>	<i>Índice de prioridade modificado (%). Figura 5.3</i>
CGB	8	8
CGC	34	5
CGM	15	5
CGS	4	4
CGJ	1,5	25
CGI	18	1
CGA	11	11
CGR	20	10
AQU	10	5

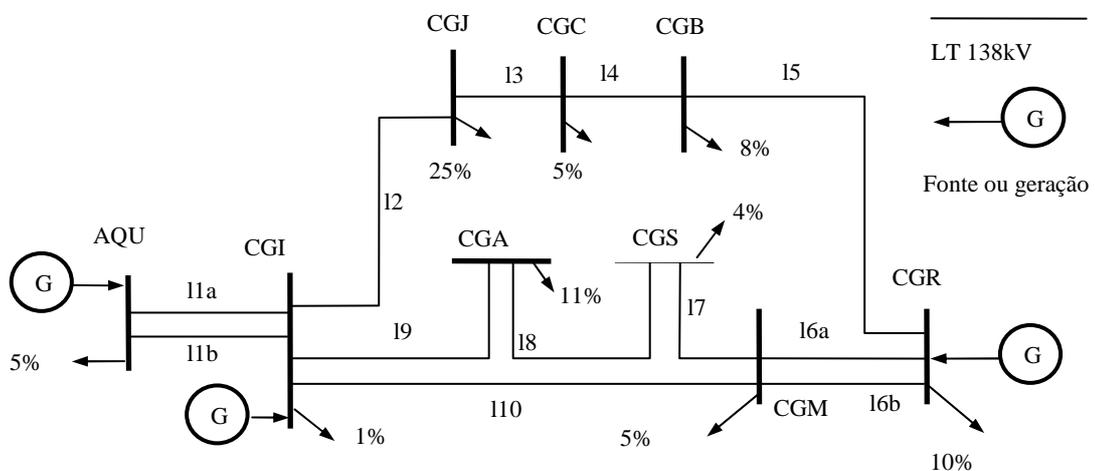


Figura 5.3 - Diagrama unifilar simplificado da região de Campo Grande – estudo de caso 2, nova prioridade

Neste estudo de caso 2, com os índices de prioridades alterados os resultados são apresentados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Resultado caso 2 – região de Campo Grande – nova prioridade

<i>Seqüência de energização ótima</i>	[15,14,13,16ab,17,18,12,11ab,110,19]
<i>Valor de fitness solução ótima</i>	31,78
<i>Tempo BE</i>	85,23 s
<i>Dimensão total espaço de busca</i>	3.628.800 combinações
<i>Tamanho da população AG</i>	100
<i>Taxa de cruzamento</i>	90%
<i>Taxa de mutação</i>	1%
<i>Número gerações mínimo para encontrar a solução</i>	1.000
<i>Quantidade de soluções analisadas AG</i>	100.000 possíveis soluções
<i>Tempo AG</i>	83,00 s

Analisando o caso 2 através da busca AG, com a nova prioridade, os resultados obtidos são semelhantes em relação ao tempo e quantidades de soluções analisadas, quando comparado com o estudo com prioridade normal. Nota-se que houve mudança na prioridade de energização, devido a mudança efetuada neste índice nas barras.

c) Prioridade normal – recomposição parcial

Neste estudo de caso 2, as linhas conectando de CGR até AQU já se encontravam energizadas, sendo necessário religar as demais linhas que atendem a região de Campo Grande, conforme demonstrado na Figura 5.4.

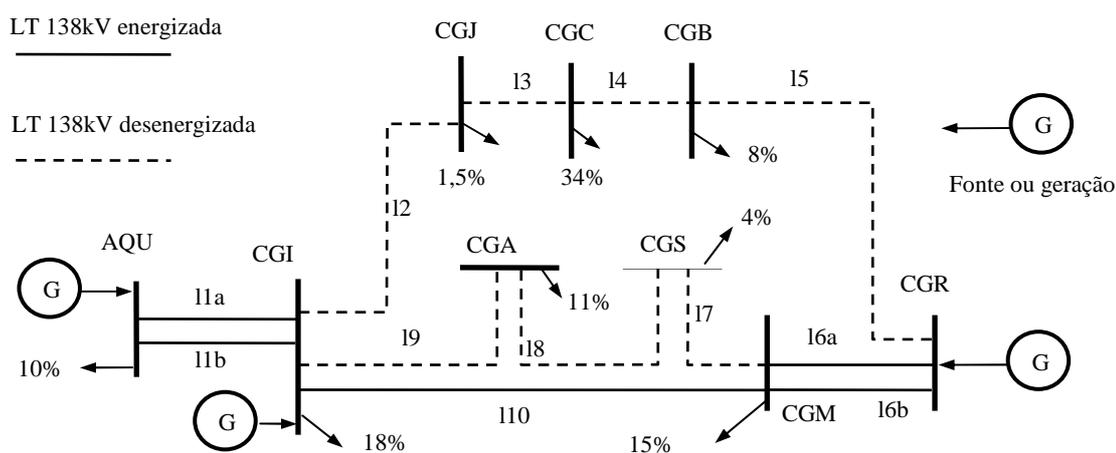


Figura 5.4 – caso 2, energização parcial região de Campo Grande

Neste estudo de caso 2, recomposição parcial da região de Campo Grande, partindo da subestação de CGR, os resultados são apresentados na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Resultado caso 2 – região de Campo Grande – recomposição parcial

<i>Seqüência de energização ótima</i>	[15,14,17,18,19,13,12]
<i>Valor de fitness solução ótima</i>	33.50
<i>Tempo BE</i>	8,55 s
<i>Dimensão total espaço de busca</i>	5.040 combinações
<i>Tamanho da população AG</i>	30
<i>Taxa de cruzamento</i>	90%
<i>Taxa de mutação</i>	1%
<i>Número gerações mínimo para encontrar a solução</i>	200
<i>Quantidade de soluções analisadas AG</i>	6.000 possíveis soluções
<i>Tempo AG</i>	4,11 s

Nota-se no estudo de caso 2, recomposição parcial, enquanto a quantidade de soluções possíveis no AG aumentou, e o tempo de processamento foi um pouco menor no AG.

Para o estudo de caso 2, no Anexo B são apresentados exemplo de resultado obtido no aplicativo Matlab [58] e telas gráficas do módulo RECOMPOR [59].

5.2.3 Estudo de caso 3 – circuitos de Jupia/Corumbá

a) Recomposição parcial (partindo de CGR)

Para o estudo de caso 3, buscou-se inicialmente a energização parcial da região de Campo Grande e Corumbá. As linhas de JUP/MIM/CGR/CGM/CGI foram energizadas previamente para facilitar a recomposição do restante do sistema, conforme Figura 5.5

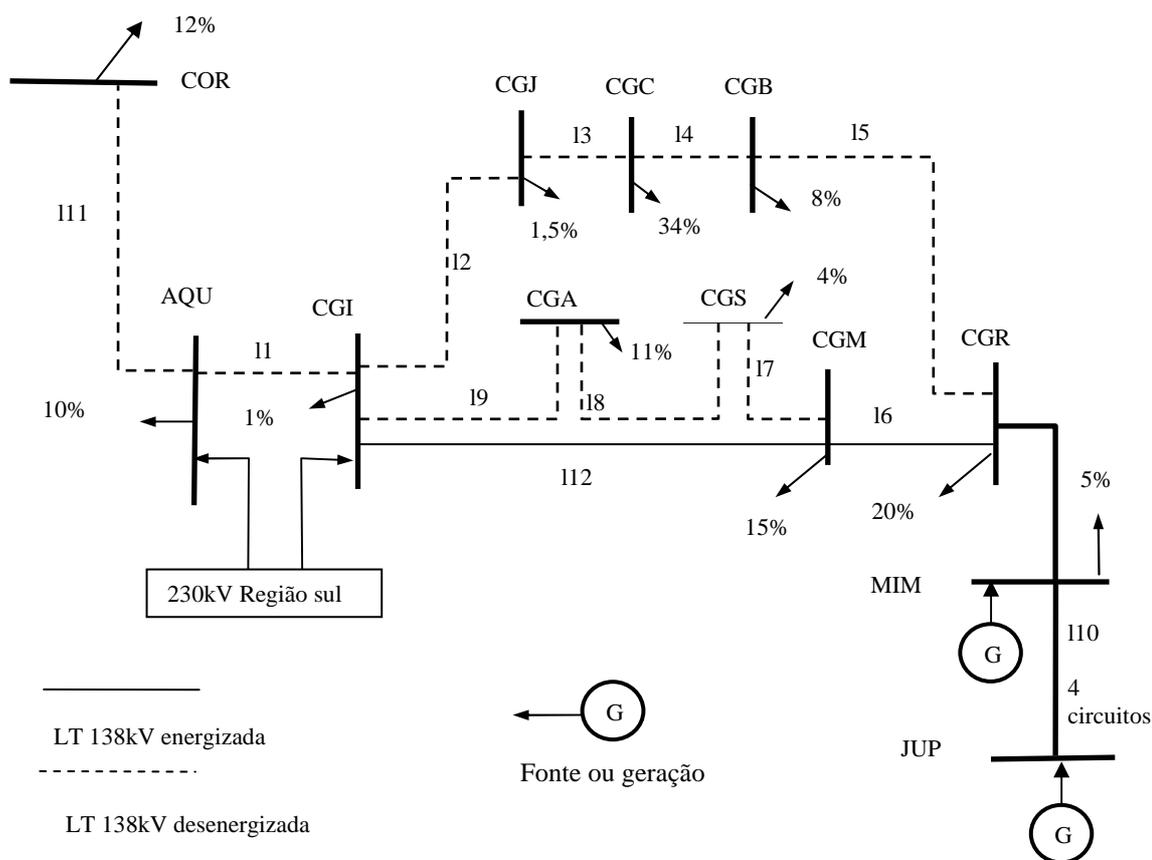


Figura 5.5 - Diagrama unifilar simplificado da região entre a usina de Jupiá e Corumbá, parcialmente energizado

O resultado para o caso 3, recomposição parcial é apresentado na Tabela 5.7, a energização parcial do sistema entre a fonte de JUP até a subestação de CGI foi utilizada para simplificar a resolução do problema e o tempo computacional envolvido na BE. Considerou-se a barra de CGR como ponto inicial de energização.

Tabela 5.6 – Resultado caso estudo 3 – região de Jupia/Corumbá – recomposição parcial

<i>Seqüência de energização ótima</i>	[15,14,11,111,17,18,13,12,19]
<i>Valor de fitness solução ótima</i>	45,88
<i>Tempo BE</i>	156 s
<i>Dimensão total espaço de busca</i>	362.880 combinações
<i>Tamanho da população AG</i>	40
<i>Taxa de cruzamento</i>	90%
<i>Taxa de mutação</i>	1%
<i>Número gerações mínimo para encontrar a solução</i>	1000
<i>Quantidade de soluções analisadas AG</i>	40.000 possíveis soluções
<i>Tempo AG</i>	60 s

Nota-se no caso 3, recomposição parcial, que o tempo necessário para resolução utilizando AG é bem menor que na BE.

Para o estudo de caso 3, no Anexo B são apresentados exemplo de resultado obtido no aplicativo Matlab [58] e telas gráficas do módulo RECOMPOR [59].

b) Recomposição parcial (partindo de CGI)

Para este caso 3, a energização foi iniciada nas subestações de AQU e CGI que possuem conexão com a rede básica de 230 kV, proveniente das usinas da região Sul do Brasil e UH Porto Primavera. Neste caso a fonte de JUP foi considerada como indisponível. As linhas de AQU/COR e AQU/CGI foram energizadas previamente para facilitar a recomposição do restante do sistema, conforme Figura 5.6

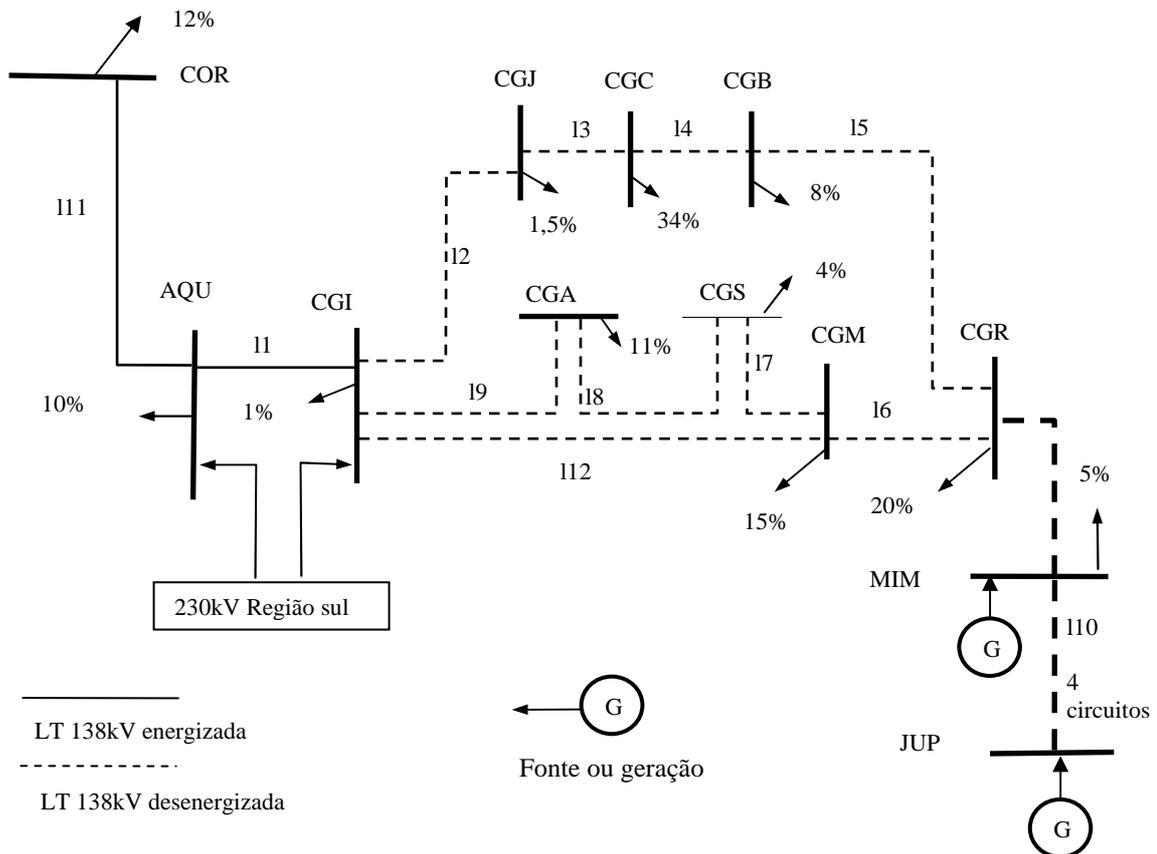


Figura 5.6 - Diagrama unifilar simplificado da região entre a usina de Jupiá e Corumbá, parcialmente energizado via 230 kV

O resultado do caso 3, recomposição parcial via 230 kV são apresentados na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 – Resultado caso estudo 3 –recomposição parcial via 230kV

<i>Seqüência de energização ótima</i>	[12,13,14,15,16,17,18,110,112,19]
<i>Valor de fitness solução ótima</i>	42,06
<i>Tempo BE</i>	151 s
<i>Dimensão total espaço de busca</i>	3.628.800 combinações
<i>Tamanho da população AG</i>	200
<i>Taxa de cruzamento</i>	90%
<i>Taxa de mutação</i>	1%
<i>Número gerações mínimo para encontrar a solução</i>	1000
<i>Quantidade de soluções analisadas AG</i>	200.000 possíveis soluções
<i>Tempo AG</i>	147 s

Nota-se no estudo de caso 3, recomposição parcial, de acordo com a Figura 5.6, que o tempo do AG foi um pouco menor e o espaço de busca analisado foi em torno de 5,0% quando comparado com a BE.

5.3 Considerações finais

Este capítulo procurou apresentar resultados das simulações que comprovem o funcionamento do algoritmo computacional, comparado com a técnica de busca exaustiva, que teoricamente apresenta o resultado ótimo, pois analisa todo o espaço de busca.

Procurou-se a sintonização melhor possível dos parâmetros do AG de forma a determinar a partir de qual população, e qual número máximo de gerações o resultado do AG permaneceria no ranking obtido no *Benchmark*.

A função custo utilizada para BE foi a mesma utilizada para o AG, de forma que o valor do *fitness* de ambas soluções ótima deve ser igual.

Para casos analisados de até 10 linhas, com uma combinação de 3.628.800 soluções é possível afirmar que o AG tem um tempo de solução menor quando comparado a BE, isto provavelmente deve-se ao tamanho do espaço de busca analisado no AG.

Em simulações realizadas de uma maneira preliminar com 12 linhas, exemplo da energização total do caso 3, onde o espaço de busca é de 479.001.600 soluções, o AG apresentou solução em 715 s, enquanto que a BE apresentou solução em tempo superior a 50 minutos. Isto confirmaria o parágrafo anterior, demonstrando que quanto maior o sistema o AG torna-se vantajoso em termos de tempo computacional.

Para sistemas menores, a BE é mais bem utilizada, para sistemas maiores o AG apresentou um tempo bem melhor. Nota-se neste trabalho, que podem ser feitas melhorias na técnica, conforme descrito no capítulo seguinte, de forma a aperfeiçoar mais ainda o tempo de processamento. Em alguns casos o AG pode estar analisando soluções repetidas de uma geração para outra, fato este que pode ser comprovado na quantidade de soluções analisadas serem maior que o próprio espaço de busca em sistemas menores, exemplo do caso 1.

Deve-se considerar também, conforme verificado nas simulações, que mesmo com a sintonização perfeita dos parâmetros, devido as suas características probabilísticas, ocorreu que em algumas simulações, o AG genético hora apresentava valores bem próximos do *fitness*, hora valores idênticos. Neste caso, verificaram-se no final do seqüenciamento, diferenças entre as linhas a serem energizadas.

CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES

6.1 Conclusões

Esta dissertação demonstrou a possibilidade de efetuar seqüenciamento ótimo da recomposição de sistemas elétricos de subtransmissão utilizando a técnica de AG, baseado na prioridade de energização de barras e regras das IO's. Para isto, foi desenvolvido um algoritmo computacional semelhante ao utilizado para resolução de problemas do tipo caixeiro viajante, utilizando técnicas mais simples do AG.

O problema de recomposição das linhas foi representado como um cromossomo, cada um como um candidato em potencial a melhor solução do problema. A aplicação dos operadores genéticos, após uma sintonia cuidadosa, permitiu através de a evolução genética encontrar seqüências de recomposição consideradas ótimas para cada caso.

O algoritmo, quando comparado com a BE, apresentou tempo bem inferior para obter a solução considerada ótima. Isto provavelmente deve-se a forma como o AG funciona, analisando um conjunto de soluções de cada vez, e não todas as soluções simultaneamente. Na BE é necessário montar todas as soluções em uma determinada matriz, ou árvore de busca. Conforme demonstrado no capítulo anterior, o espaço de busca obtido pode ser muito grande, pois se trata de um numero fatorial. No AG esta matriz, como é analisada de geração em geração, torna-se menor, ocupando um tempo menor de processamento do computador, muito embora a quantidade de soluções analisadas em todas as gerações também seja elevada.

No AG notaram-se os seguintes comportamentos na resposta, quando do ajuste dos parâmetros:

- Quanto maior a população inicial do problema, mais tempo de processamento é necessário e conseqüentemente maior *fitness* é obtido;

- Quanto maior a taxa de cruzamento melhor o *fitness* obtido e a convergência ocorre em uma menor quantidade de gerações;
- O tempo computacional depende muito do tamanho da população, alteração nos parâmetros de cruzamento e mutação não afetou o tempo necessário para resolução do problema;
- Quando aumentada significativamente a taxa de mutação a busca torna-se aleatória e muito parecida com a BE;
- Mudança nos parâmetros de tamanho da população, versus número máximo de gerações não provocou mudança significativa no resultado ou no tempo de processamento. Ou seja, um caso com população igual a 10 e número de gerações 100, apresentou resultados semelhantes que uma população igual a 20 e número de gerações 50.

A sintonia e controle preciso dos parâmetros no AG são fundamentais para a convergência do problema, e dependem de cada sistema analisado. Se alterado o sistema é necessária nova sintonia dos parâmetros.

A técnica de AG, como uma metaheurística, não garante que o resultado obtido seja realmente a solução global. A partir da sintonia correta, podem-se obter resultados considerados satisfatório. Os resultados obtidos, seja através de simulação de circuitos com 4 barras, até a representação de sistemas maiores demonstram plena concordância com o que é observado na realidade.

A técnica apresentada neste trabalho, baseado nos resultados obtidos, atende a necessidade cada vez maior das empresas, em desenvolver aplicativos computacionais que auxiliem a operação de seus sistemas elétricos de forma automática, utilizando técnicas de IA. A filosofia ideal para o futuro das redes de transmissão são as redes inteligentes, onde através de diversos sensores e sistemas computacionais possa ocorrer uma recomposição automática com o mínimo de intervenção possível.

A utilização de processadores computacionais cada vez mais velozes, aliados a técnicas também eficientes, possibilitará a adoção de ferramentas conforme desenvolvida neste trabalho, dentro dos EMS, SCADA e DMS num futuro próximo. Levando-se sempre em consideração que o tempo de resposta do algoritmo utilizado deve ser satisfatório para as necessidades da operação dos sistemas.

6.2 Propostas para trabalhos futuros

Muitas são as melhorias possíveis para trabalhos futuros, tais como a verificação do fluxo de potência nas redes durante a recomposição do sistema. As soluções encontradas pelo algoritmo deveriam verificar o carregamento das linhas e níveis de tensão das barras, de forma a garantir a total aplicação da seqüência de recomposição sugerida.

Um dos casos estudados na seção 5.2.3, em razão da não verificação do fluxo de potência, apresentou uma seqüência de recomposição em forma de anel, onde a rede poderia estar submetida a uma sobrecarga, inviabilizando o plano apresentado. A análise do fluxo de potência poderia ter detectado este problema e buscado uma nova solução.

Outras melhorias podem ser executadas na técnica de AG, explorando novos métodos de cruzamento, mutação, seleção ou critério de parada. O AG corresponde a um conjunto muito grande de técnicas. Podem ser desenvolvidos também algoritmos híbridos, com outras técnicas de otimização ou sistemas especialistas baseado em regras.

Os novos trabalhos desenvolvidos devem procurar sempre um compromisso em automatizar o máximo possível a operação das redes elétricas, seguindo as IO's, procedimentos e normas técnicas das áreas de operação, atendendo também aos requisitos de qualidade no fornecimento de energia elétrica, não comprometendo o funcionamento das linhas e equipamentos do sistema.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BIBLIOGRAFIAS UTILIZADAS

- [1] Sauer, Ildo – Um novo modelo para o setor elétrico brasileiro, IEE-USP, Dez/2002.
- [2] Site do Operador Nacional do Sistema (ONS), www.ons.org.br.
- [3] Miller, Robert H.; Operação de Sistemas de Potência, McGraw-Hill, Eletrobrás, Rio de Janeiro, 1987
- [4] Procedimentos de Rede do ONS, módulo 1 a 23, ONS, 2002.
- [5] Carlos Roberto R. Leite et al - O uso de simuladores no treinamento de operadores da CHESF, II Seminário Internacional Reestruturação e regulação do setor de energia elétrica e gás natural, UFRJ, 2007.
- [6] Luiz Carlos Santini Jr Sistemas de Supervisão e Controle na Geração, Transmissão e Distribuição, experiência da ENERSUL. VII – EDAO, Foz do Iguaçu, 2002.
- [7] Protocolo de comunicação MODBUS, Modicon, Schneider Electric.
- [8] Allan Cascaes Pereira et al – Integração dos sistemas de proteção, controle e automação de subestações e usinas – Estado da arte e tendências, XVIII SNPTEE, Curitiba, 2005.
- [9] Allan Cascaes Pereira et al – Automação de subestações e usinas – estado da arte e tendências utilizando a norma IEC 61850, VII Simpase, Salvador, 2007.
- [10] Debra Wetteroth – OSI Reference Model for Telecommunications, McGraw-Hill, 2002.
- [11] Manual técnico protocolo de comunicação IEC 61.850
- [12] Manual técnico protocolo de comunicação DNP 3.0
- [13] BACH, Maurice J. The design of the Unix operating system. Upper Saddle River: Prentice Hall. 1990.
- [14] Kolnick, Frank. The QNX 4 Real-time Operating System, Basis Computer Systems, 2000.
- [15] F. Momal, From a UNIX to a PC based SCADA system. CERN, Geneva
- [16] North American Electric Reliability Council (NAERC), Technical analysis of the August 14,2003 blackout: what happened, why, and what did we learn?, 2004.

- [17] Amin, Massoud, Schewe, Phillip F. Como prevenir os blecautes, Scientific American Brasil, Junho/07.
- [18] Bronzeado, Herivelto S. Indicadores de qualidade de energia, Chesf, Recife.
- [19] Procedimentos recomposição fases fluente e coordenada, ONS.
- [20] Marcello de Baptista de Martino et al, Sistema Especialista de Auxilio à Recomposição do Sistema Furnas, CEPEL/FURNAS, XV SNPTEE, Foz do Iguaçu, 1999.
- [21] Adibi, Fink et al. New Approaches in Power System Restoration, IEEE transactions on Power Systems, fev/1992.
- [22] K. Komai, K. Matsumoto, T. Sakaguchi. Analysis and evaluation of expert's knowledge for Power system restoration by mathematical programming method. Proceedings. IEEE Int. symp. Circuits and systems, 1988.
- [23] Toune et al. Comparative Study of Modern Heuristic Algorithms to Service Restoration in Distribution Systems. IEEE Transactions on Power Delivery. 2002.
- [24] Mori H., Tani H. A hybrid method of PTS and ordinal optimization for distribution system service restoration. IEEE Transactions on Distribution System. 2003.
- [25] Kumar Y. Das B. Sharma J. Genetic algorithm for supply restoration in distribution system with priority customers.
- [26] J.J. Jiménez and J.R. Cedeño. Application of Particle Swarm Optimization for Electric Power System Restoration. PowerCON, 2003.
- [27] M.M. Adibi, "Power system restoration methodologies and implementation strategies", IEEE Press Power Eng. Series, 2000.
- [28] Fukuyama Y. Endo H. Nakanishi Y. A hybrid system for service restoration using expert system and GA. IEEE, 1996.
- [29] Garey, M. and D. Johnson, Computers and Intractability; A Guide to the Theory of NP-Completeness, 1979.
- [30] Matsumoto K. Sakaguchi T. Kafka R. Adibi M. Knowledge-based systems as operational aids in Power system restoration. Proceedings of the IEEE, vol 80. no 5, 1992.
- [31] Nielsen, Adibi, Barrie, Cooper et al. A report by the current operational problems, working group-E. IEEE Transactions on Power Systems, vol 3, no 1, pp 118-124, Fev/1988.
- [32] Valiquette, Lambert Torres, Mukhedkar. An expert system based diagnosis and advisor tool for teaching power operation emergency control strategies. IEEE. Transactions on power systems, vol. 6, No. 3, Ago/1991.
- [33] Adibi M.M., Kafka R.J.. Power System Restoration Issues. IEEE Transactions on Computer Applications in Power, 1991.

- [34] Huang, Galiana e Vuong. Power System Restoration Incorporating Interactive Graphics and Optimization. IEEE Power Industry Computer Application Conference, pp 216-222, Mai/1991.
- [35] A. Ebert et al. System Restoration of a Transmission Network. Siemens AG, IEEE catalogue no. 95TH130. 1995.
- [36] Higashi S., Sartor A., Rabelo R. Um sistema multi-agente para o auxílio à recomposição na fase coordenada. V Simpase. Recife, 2004.
- [37] Matos A. Leite L. Pinto J. Metodologia para otimização da recomposição baseada na busca Tabu adaptativa e seletiva. Dissertação de Mestrado, UFMS, 2007.
- [38] Siqing et al. Integrating Genetic Algorithm with Expert System for Service Restoration in Distribution System. IEEE. 1998.
- [39] Kumar Y. Das B. Sharma J. Genetic Algorithm for supply restoration in distribution system with priority customers. 9th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems KTH, Suécia, 2006.
- [40] Delbem A. Carvalho A. Bretas N. Restabelecimento ótimo de energia em sistemas de distribuição utilizando AG. XIV SNPTEE. Belém, 1997.
- [41] Morelato A.; Monticelli A. Heuristic search approach to distribution systems Restoration. IEEE Transactions on Power Delivery. V.4. N.4 1989.
- [42] Yoshikazu F.; Endo H.; Nakanishi Y. A hybrid system for service restoration using expert system and genetic algorithm. IEEE. 1996.
- [43] Turing Alan M. Computer machinery and intelligence, 1950.
- [44] Selegim, Paulo Jr. Réplicas de nossa complexidade, Scientific American Brasil, Janeiro/06.
- [45] Bretas Arturo S. Phadke Arun G. Artificial Neural Networks in Power System Restoration, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 18, n. 4, Outubro, 2003.
- [46] Isermann R. On Fuzzy Logic Applications for Automatic Control, Supervision, and Fault Diagnosis. IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics, vol. 28, no. 2, 1998.
- [47] Darwin, Charles – A Origem das Espécies, W. W. Norton & Company; 2ª Edição, 2002.
- [48] Dawkins R. The blind Watchmaker, New York, WW Norton, 1986.
- [49] Alves, Arleide Cristina, Algoritmo genético aplicado ao planejamento da distribuição de energia elétrica em Curitiba e região metropolitana, Tese de mestrado, UFPR, 2002.
- [50] Holland, John. Adaptation in Natural and Artificial Systems, 1975.
- [51] Corrêa, E. S. Algoritmos Genéticos e Busca Tabu aplicados ao problema das P-medianas. Dissertação de Mestrado, UFPR, Curitiba, 2000.
- [52] Tanomaru, J. Motivação, fundamentação e aplicação de Algoritmos Genéticos. Congresso brasileiro de redes neurais, 1995, Curitiba.

- [53] Goldberg, David E, Genetic Algorithms in search optimization & machine learning, Addison-Wesley Publishing, 1989
- [54] Whitley, Darrell. An Overview of Evolutionary Algorithms. Journal of Information and Software Technology 43:817-831, 2001.
- [55] Eshelman L. The CHC Adaptive Search Algorithm. Foundations of Genetic Algorithms. G. Rawlins, Ed. Morgan-Kaufmann. pp. 256-283.
- [56] S. Kirkpatrick and C. D. Gelatt and M. P. Vecchi, Optimization by Simulated Annealing, Science, Vol 220, Number 4598, pages 671-680, 1983.
- [57] Muhlenbein, H. How genetic algorithms really work: I. Mutation and Hillclimbing, Parallel Problem Solving from Nature -2-, R. Manner and B. Manderick, North Holland, 1992.
- [58] Matlab versão 7. Mathworks Inc, 1984-2004.
- [59] Galloto, Luigi, Santini Jr. L C, Gonçalves, Antonio M M. Aplicativo Matlab EXPERT e RECOMPOR. Recomposição de Sistemas Elétricos, P&D UFMS/ENERSUL, 2006.
- [60] REC_ESP. Sistema Especialista de Auxilio a Recomposição, P&D UFMS/ENERSUL, 2006.

BIBLIOGRAFIAS AUXILIARES

Keinosuke Matsumoto, Toshiaki Sakaguchi, Richard J. Kafka e Mike M. Adibi, procedimento do IEEE, vol 80, n. 5, maio/1992

Amin, Massoud, Wollenberg Bruce F. Toward a smart grid: power delivery for the 21st century, IEEE Power and Energy Magazine, vol 3, n° 5, Setembro/2005.

Schewe, Phillip F. The grid: a journey through the heart of our electrified world. Joseph Henry Press, 2007.

Komninos, Nicos. Intelligent cities – Innovation, knowledge systems and digital spaces, Spon Press, 2002.

Russel, Stuart J., Norvig, Peter. Artificial Intelligence: a modern approach, Prentice Hall, 2002.

Anexo A: Código Matlab AG e BE

Exemplo do código do AG:

```
function [eliteSeq,info]=ga(kb,info,tipo);

tic;

if tipo == 2,
    error('O ga so funciona com sequencia. Tipo 1.')
end

% Nro_Indiv = length(kb.line);

cont=0;
vet=[];

for k=1:length(kb.line);
    teste=0;
    for p=1:kb.line(k).numcircuit;
        if ~kb.line(k).circuit(p).ligado;
            teste=1;
        end
    end
    if teste;
        cont=cont+1;
        vet=[vet,k];
    end
end

Nro_Indiv=cont;

%Adeq = 200.00;
ProbCruza = 0.6;
ProbMutat = 0.04;
GeracaoMax = 200;
Nro_pop = 20;

eliteResultado=1e9;
geracaoElite=0;
elite_graf=zeros(1,GeracaoMax);
Result_medio_graf=zeros(1,GeracaoMax);
Result_max_graf=zeros(1,GeracaoMax);
Geracao_graf=zeros(1,GeracaoMax);

% Geracao dos indivíduos aleatorios
for i=1:Nro_pop
    Indiv(i,:) = vet(randperm(Nro_Indiv));
end

Resultado = fcusto(Indiv,kb);

eliteSeq = [];
for i=1:Nro_pop
    if (eliteResultado > Resultado(i))
```

```

    eliteResultado=Resultado(i);
    eliteSeq=Indiv(i,:);
    geracaoElite=0;
end
end

% Checar a condição atual do sistema

% Verificar se há algum gerador ligado
anygen = 0;
for k = 1:length(kb.gen),
    if kb.gen(k).ligado,
        anygen = 1;
    end
end
if ~anygen, % Se não há, então aguardar
    info.fim = 0;
    info.string = 'Blackout!! Ligue um gerador para iniciar a recomposição.';
    eliteSeq = [];
end

if ~isempty(eliteSeq),
for geracao=1:GeracaoMax

% ALGORITMO GENETICO: SELECAO
ProbRoleta=Resultado/sum(Resultado);
Roleta=cumsum(ProbRoleta);

for i=1:Nro_pop
    IndivNovo(i,:)=Indiv(min(find(Roleta>rand)),:);
end
Indiv=IndivNovo;

% ALGORITMO GENETICO: CRUZAMENTO
for i=1:2:Nro_pop
    if (rand<=ProbCruza)
        for j=1:Nro_Indiv
            if (rand<=.5)
                aux_impar=Indiv(i,j);
                aux_par=Indiv(i+1,j);
                Indiv(i,find(Indiv(i,:)==aux_par))=aux_impar;
                Indiv(i+1,find(Indiv(i+1,:)==aux_impar))=aux_par;
                Indiv(i,j)=aux_par;
                Indiv(i+1,j)=aux_impar;
            end
        end
    end
end

% ALGORITMO GENETICO: MUTACAO
for i=1:Nro_pop
    if (rand<=ProbMutat)

```

```

    indice=floor(rand(2,1)*(Nro_Indiv-1)+1);
    aux=Indiv(i,indice(1));
    Indiv(i,indice(1))=Indiv(i,indice(2));
    Indiv(i,indice(2))=aux;
end
end

Resultado = fcusto(Indiv,kb);

for i=1:Nro_pop
    if (eliteResultado < Resultado(i))
        eliteResultado=Resultado(i);
        eliteSeq=Indiv(i,:);
        geracaoElite=geracao;
    end
end

elite_graf(geracao)=eliteResultado;
Result_medio_graf(geracao)=sum(Resultado)/Nro_pop;
Result_max_graf(geracao)=max(Resultado);
Geracao_graf(geracao)=geracao;

end
end;
tempo = toc;

plot(Geracao_graf,elite_graf,'k');

disp( ['Tempo de processamento (s):      ',num2str(tempo,'%7.2f')]);
disp(['Valor Otimo encontrado   :      ',num2str(eliteResultado,'%7.2f')]);
disp(['Valor obtido na geracao:      ',num2str(geracaoElite,'%10d')]);
disp(['SEQUENCIA RECOMENDADA:  ['',num2str(eliteSeq,'%3d'), '']]);
disp(' ');
disp(' ');

% Verificar se ainda há linhas desligadas
if isempty(vet)
    anybus = 0;
    for k = 1:length(kb.bus),
        if ~kb.bus(k).ligado,
            anybus = 1;
        end
    end
    if anybus,
        info.fim = 0;
        info.string = 'Sem soluções viáveis. Conserte linhas ou Ligue mais geradores.';
        eliteSeq = [];
    else
        info.fim = 1;
        info.string = 'Sistema Energizado';
        eliteSeq = [];
    end
end
end

```

Exemplo do código da BE

```
function [param, info] = nextexaustivo(kb,info,op)
fim = 0;
texto = "";
param = [];

if op == 1,
    % Gerar todo o espaço de busca 1
    mat = space1(kb);

    % Função custo e Restrições
    % [fit,restr,ons] = avaliars1(mat,kb);
    [fit,ons,restr] = fcusto(mat,kb); % Função custo do GA

    [melhores,ind] = sort(fit,1,'descend');

    permit = find(restr(ind) == 0);

    if ~isempty(permit),
        param = mat(ind(permit(1)),:);
        if ons(ind(permit(1))),
            texto = 'Pedir autorização à ONS';
        end
    end

    disp(' ');
    disp(' SOLUÇÕES COM BUSCA EXAUSTIVA ');
    disp(['Tamanho do Espaço de busca: ', num2str(size(mat,1),'%7d')]);
    disp(['Melhor Custo: ', num2str(melhores(1),'%7.2f')]);
    disp(['SEQUENCIA RECOMENDADA:  ', num2str(mat(ind(1),:),'%3d'), ' ']);
    disp(' ');

else
    % Gerar todo o espaço de busca 2
    mat = space2(kb);
```

```

[mat,cor]=findlinhas(kb,mat);

% Função custo e Restrições
[fit,restr,ons] = avaliars2(mat,kb);

[melhores,ind] = sort(fit,1,'descend');

permit = find(restr(ind) == 0);

if ~isempty(permit),
    param = mat(ind(permit(1)),:);
    if ons(ind(permit(1))),
        texto = 'Pedir autorização à ONS';
    end
end

% Tirar os zeros
ind = find(param == 0);
if ~isempty(ind),
    param(ind) = [];
end

end

info.string = texto;

% Se não encontrou uma solução
if isempty(param),
    % Verificar se há algum gerador ligado
    anygen = 0;
    for k = 1:length(kb.gen),
        if kb.gen(k).ligado,
            anygen = 1;
        end
    end
end

if ~anygen, % Se não há, então aguardar
    info.fim = 0;
    info.string = 'Blackout!! Ligue um gerador para iniciar a recomposição.';
end

```

```
else
    % Verificar se ainda há linhas desligadas
    anybus = 0;
    for k = 1:length(kb.bus),
        if ~kb.bus(k).ligado,
            anybus = 1;
        end
    end
end
if anybus,
    info.fim = 0;
    info.string = 'Sem soluções viáveis. Conserte linhas ou Ligue mais geradores.';
else
    info.fim = 1;
    info.string = 'Sistema Energizado';
end
end
end
```

Exemplo do código da função geradora do espaço de BE

```
function mat = space1(kb,op);

if nargin < 2,
    op = 2;
end

switch op,
case 1,
    % contar as linhas desligadas e sem falha
    cont = 0;
    seq = zeros(length(kb.line),1);
    for m = 1:length(kb.line),
        anydeslig = 0;
        for n = 1:kb.line(m).numcircuit,
            if (kb.line(m).circuit(n).ligado == 0) & (~kb.line(m).circuit(n).falha),
                anydeslig = 1;
            end
        end
        if anydeslig, % Se alguma linhas desligada em paralelo
            cont = cont + 1;
            seq(m) = 1;
        end
    end

    ind = find(seq == 1);

    % inicializar
    tam = factorial(cont);
    mat = zeros(tam,cont);

    mat2 = permutar(cont);
    for m = 1:tam,
        for n = 1:cont,
            mat(m,n) = ind(mat2(m,n));
        end
    end

case 2,
    mat = [];

    % contar as linhas desligadas e sem falha
    cont = 0;
    seq = zeros(length(kb.line),1);
    matlig = zeros(length(kb.bus));
    for m = 1:length(kb.line),
        anydeslig = 0;
        % Para todas as linhas em paralelo
        for n = 1:kb.line(m).numcircuit,
            if (kb.line(m).circuit(n).ligado == 0) & (~kb.line(m).circuit(n).falha),
                anydeslig = 1;
            end
        end
    end
```

```

if anydeslig, % Se há alguma linha em paralelo desligada e sem defeito
    cont = cont + 1;
    seq(m) = 1;
    matlig(kb.line(m).to,kb.line(m).from) = m;
    matlig(kb.line(m).from,kb.line(m).to) = m;
end
end
ndesl = cont;

if ndesl ~= 0, % se houver alguma linha desligada.
    bordas = edgebus(kb);

    if ~isempty(bordas),
        % ----- construir arvore de opções de linhas -----
        proximos = encontrarproximas(kb,matlig,bordas,[]);

        % armazenar o primeiro nivel de linhas
        % Para cada linha
        for k = 1:length(proximos),
            nivel(1).ramo(k).linha = proximos(k);
            nivel(1).ramo(k).ramo_anterior = 0;
            nivel(1).ramo(k).linhas_anteriores = [];
        end

        niv = 1;
        % inicializar a arvore
        if ndesl > 1, nivel(ndesl).ramo(1).linha = []; end;

        if ndesl > 5, hwait = waitbar(0,'Possível 2^a Linha'); end
        while niv <= ndesl,
            if ndesl > 5, waitbar((niv)/ndesl,hwait,['Possível ' num2str(niv) '^a Linha']); end;

            niv = niv + 1;

            primeiro = 1;

            proximos = cell(1,length(nivel(niv-1).ramo));
            contramos = 0;
            for k = 1:length(nivel(niv-1).ramo),
                proximos{k} = encontrarproximas(kb,matlig,bordas,[nivel(niv-
1).ramo(k).linhas_anteriores, nivel(niv-1).ramo(k).linha]);
                contramos = contramos + length(proximos{k});
            end
            % inicializar o número de ramos do nível
            if contramos ~= 0,
                nivel(niv).ramo(contramos).linha = [];
                nivel(niv).ramo(contramos).ramo_anterior = [];
                nivel(niv).ramo(contramos).linhas_anteriores = [];
            end
            % Para cada ramo do nivel atual
            for k = 1:length(nivel(niv-1).ramo),
                % Procurar as linhas do outro nivel relacionadas ao ramo(k)

                if ~isempty(proximos{k}), % Há um novo ramo

```

```

        if primeiro,
            tamini = 0;
        else
            tamini = p+tamini;
        end
        for p = 1:length(proximos{k}),
            nivel(niv).ramo(p+tamini).linha = proximos{k}(p);
            nivel(niv).ramo(p+tamini).ramo_anterior = k;
            nivel(niv).ramo(p+tamini).linhas_anteriores = [nivel(niv-
1).ramo(k).linhas_anteriores, nivel(niv-1).ramo(k).linha];

            primeiro = 0;
            if ndesl > 5, waitbar((niv-1)/ndesl+(p+tamini)/(contramos*ndesl),hwait); end
        end
    end
end
end
if ndesl > 5, try close(hwait); end; end;
% ----- arvore de opções de linhas construida -----

niv = niv-1;
% Criar a matriz de opções
mat = zeros(length(nivel(niv).ramo),length(nivel(niv).ramo(1).linhas_anteriores)+1);
for k = 1:length(nivel(niv).ramo),
    mat(k,:) = [nivel(niv).ramo(k).linhas_anteriores, nivel(niv).ramo(k).linha];
end

end

end

end

% -----
function mat2 = permutar(n)
mat = zeros(n^n,n);

vet = 0:(n-1);
rep = n.^vet;
faixa = fliplr(rep);

for k = 1:n,
    for p = 1:rep(k),
        for m = 1:n,
            mat(((p-1)*faixa(k)*n+faixa(k)*(m-1)+1):((p-1)*faixa(k)*n+faixa(k)*m),k) =
m.*ones(faixa(k),1);
        end
    end
end
end
% excluir as linhas com numeros repetidos
aux = ones(n^n,1);
for k = 1:n,
    soma = sum((mat == k),2);
    aux = aux & ((soma == 1) | (soma == 0));
end
end

```

```

ind = find(aux == 1);
mat2 = mat(ind,:);

% -----
function proximos = encontrarproximas(kb,matlig,bordas,anteriores)

pontos = bordas;

% ligar as linhas anteriores
for p = 1:length(anteriores),
    if ~any(pontos == kb.line(anteriores(p)).from)
        pontos = [pontos, kb.line(anteriores(p)).from];
    elseif ~any(pontos == kb.line(anteriores(p)).to)
        pontos = [pontos, kb.line(anteriores(p)).to];
    end
% pontos = unique([pontos, kb.line(anteriores(p)).from, kb.line(anteriores(p)).to]);
end

% Encontrar as linhas para as barras (pontos) energizadas
proximos = unique(matlig(pontos,:));

% Eliminar o zero e as linhas antecedentes
proximos = setdiff(proximos,[0 anteriores]);

```

Exemplo do código da Função Custo AG e BE:

```
function [fit,ons,restr] = fcusto(mat,kbin);

% Avaliação da prioridade
[m,n] = size(mat);

ponderar = linspace(1,-1,n);
fit = zeros(m,1);
ons = fit;
for x = 1:m, % Varrendo as linhas
    nota1 = 0; nota2 = 10;
    kb = kbin;
    for y = 1:n,
        fbus = kb.line(mat(x,y)).from;
        tbus = kb.line(mat(x,y)).to;

        % NOTA 1 (Soma ponderada das prioridades associadas)
        % A ponderação é feita pela prioridade e pela posição y da linha)
        if kb.bus(fbus).ligado == 1,
            nota1 = nota1 + kb.bus(tbus).pri.*ponderar(y);
        else
            nota1 = nota1 + kb.bus(fbus).pri.*ponderar(y);
        end

        % NOTA 2 (Com relação as IO's - sentido de energização)
        if nota2 == 10,
            if (kb.bus(fbus).ligado == 1) & (kb.bus(tbus).ligado == 0),
                resp = ismember([fbus tbus],kb.rules,'rows');
                if resp, % Se for um sentido anormal
                    nota2 = 0;
                end
            elseif (kb.bus(tbus).ligado == 1) & (kb.bus(fbus).ligado == 0),
                resp = ismember([tbus fbus],kb.rules,'rows');
                if resp, % Se for um sentido anormal
                    nota2 = 0;
                end
            end
        end
    end
end
```

```

        end
    end
end

% Ligar a linha y
kb.bus(fbus).ligado = 1;
kb.bus(tbus).ligado = 1;
for k = 1:kb.line(mat(x,y)).numcircuit,
    if ~kb.line(mat(x,y)).circuit(k).falha,
        kb.line(mat(x,y)).circuit(k).ligado = 1;
    end
end
end
end
fit(x) = nota1 + nota2;
if nota2 == 0,
    ons(x) = 1;
else
    ons(x) = 0;
end
end
end

% Avaliação das restrições
restr = restringir(mat,kbin);

fit=fit-restr*1000;

% -----
function [ind] = restringir(mat,kb)

[m,n] = size(mat);
ind = zeros(m,1);

for x = 1:m,
    kbteste = kb;
    y = 1;
    % Está avaliando somente as duas primeiras da sequencia

```

```

while ((y <= min(2,n)) & (ind(x) == 0)),
    busf = kbteste.line(mat(x,y)).from;
    bust = kbteste.line(mat(x,y)).to;
    % Tirar linhas que nao estao ligadas em nenhuma barra energizada
    % Se tem alguma barra ligada a barra y
    if (kbteste.bus(busf).ligado == 1),
        kbteste.bus(bust).ligado = 1;    % Entao ligar a outra
        % Ligar os disjuntores
        kbteste.line(mat(x,y)).cbf = 1;
        kbteste.line(mat(x,y)).cbt = 1;
    elseif(kbteste.bus(bust).ligado == 1),
        kbteste.bus(busf).ligado = 1;    % Entao ligar a outra
        % Ligar os disjuntores
        kbteste.line(mat(x,y)).cbf = 1;
        kbteste.line(mat(x,y)).cbt = 1;
    else
        ind(x) = 1;
    end

    % Tirar linha com defeito
    alldefeito = 1;
    for k = 1:kbteste.line(mat(x,y)).numcircuit,
        if ~kbteste.line(mat(x,y)).circuit(k).falha,
            alldefeito = 0;
        end
    end
end
if alldefeito,
    ind(x) = 1;
end

y = y + 1;
end
end

```

Anexo B: Exemplo resultados obtidos no Matlab

Exemplo resultado tela RECOMPOR, estudo de caso 2, recomposição parcial, item 5.2.2 c

Neste exemplo as linhas CGR/CGM, circuito 1 e 2, CGM/CGI e CGI/AQU, circuito 1 e 2 já estavam energizadas, faltando energização das demais linhas para atendimento a região de Campo Grande.

Resultado na Figura B.1 da busca exaustiva, o numeral sobre as linhas de transmissão corresponde a ordem de prioridade de energização.

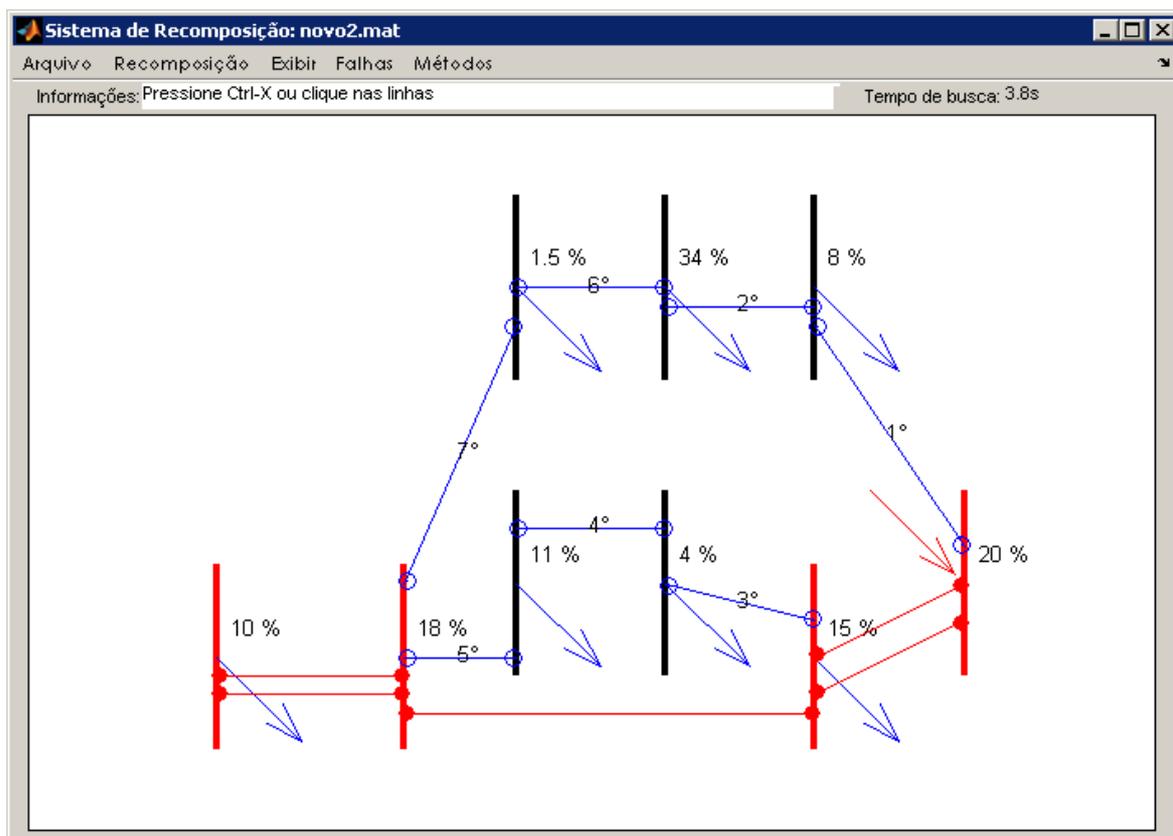


Figura B.1 – Tela módulo RECOMPOR, busca exaustiva parcial – Região de Campo Grande

Na Figura B.2 é apresentada tela do módulo RECOMPOR, recomposição total, estudo de caso 2, item 5.2.2a , resultado recomposição utilizando busca AG, o numeral sobre as linhas de transmissão corresponde a ordem de prioridade de energização.

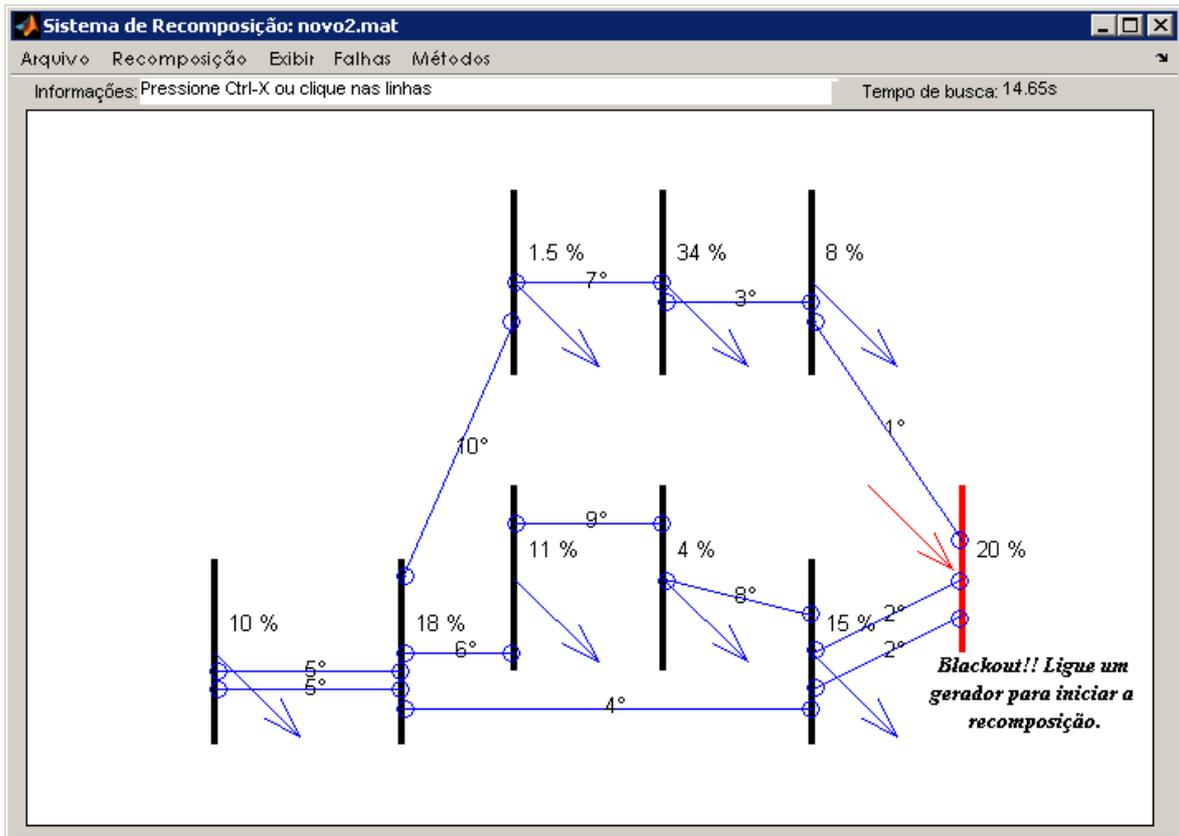


Figura B.2 – Tela módulo RECOMPOR, busca AG total – Região de Campo Grande

O resultado demonstrado abaixo corresponde ao da Figura B.2, aplicativo Matlab, sendo valor ótimo encontrado igual ao valor do *fitness*.

Tempo total de busca: 0.155 s

Tempo de processamento (s): 14.63

Valor Ótimo encontrado : 31.67

Valor obtido na geracao: 478

SEQUENCIA RECOMENDADA: [5 6 4 10 1 9 3 7 8 2]

Exemplo resultado tela RECOMPOR, estudo de caso 3, recomposição parcial, item 5.2.3 a

Neste exemplo as linhas JUP/MIM/CGR, circuito 1 a 4, CGR/CGM, circuito 1 e 2, CGM/CGI já estavam energizadas, faltando energização das demais linhas para atendimento a região de Campo Grande e região de Corumbá.

Resultado na Figura B.3 da busca exaustiva, o numeral sobre as linhas de transmissão corresponde a ordem de prioridade de energização.

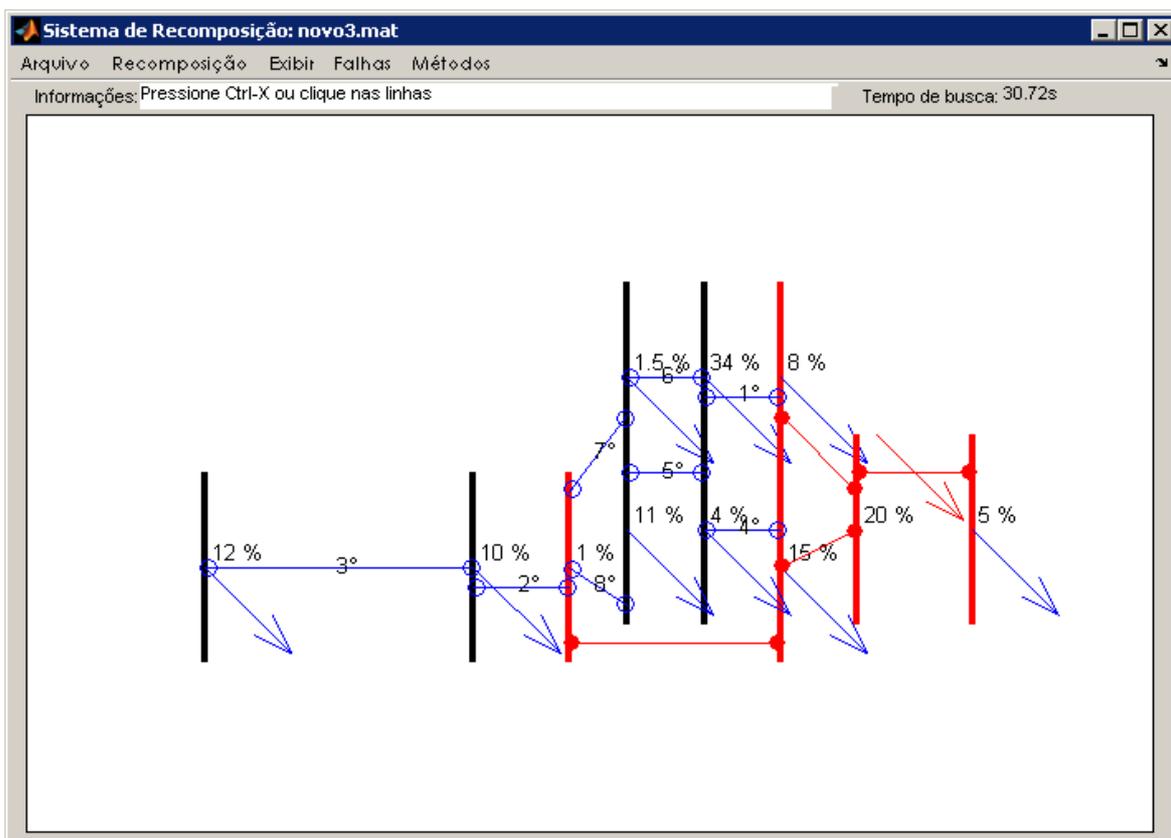


Figura B.3 – Tela módulo RECOMPOR, busca exaustiva parcial – Região de Jupia até Corumbá

Na Figura B.4 é apresentada tela do módulo RECOMPOR, recomposição total, estudo de caso 2, item 5.2.3a , resultado recomposição utilizando busca AG, o numeral sobre as linhas de transmissão corresponde a ordem de prioridade de energização.

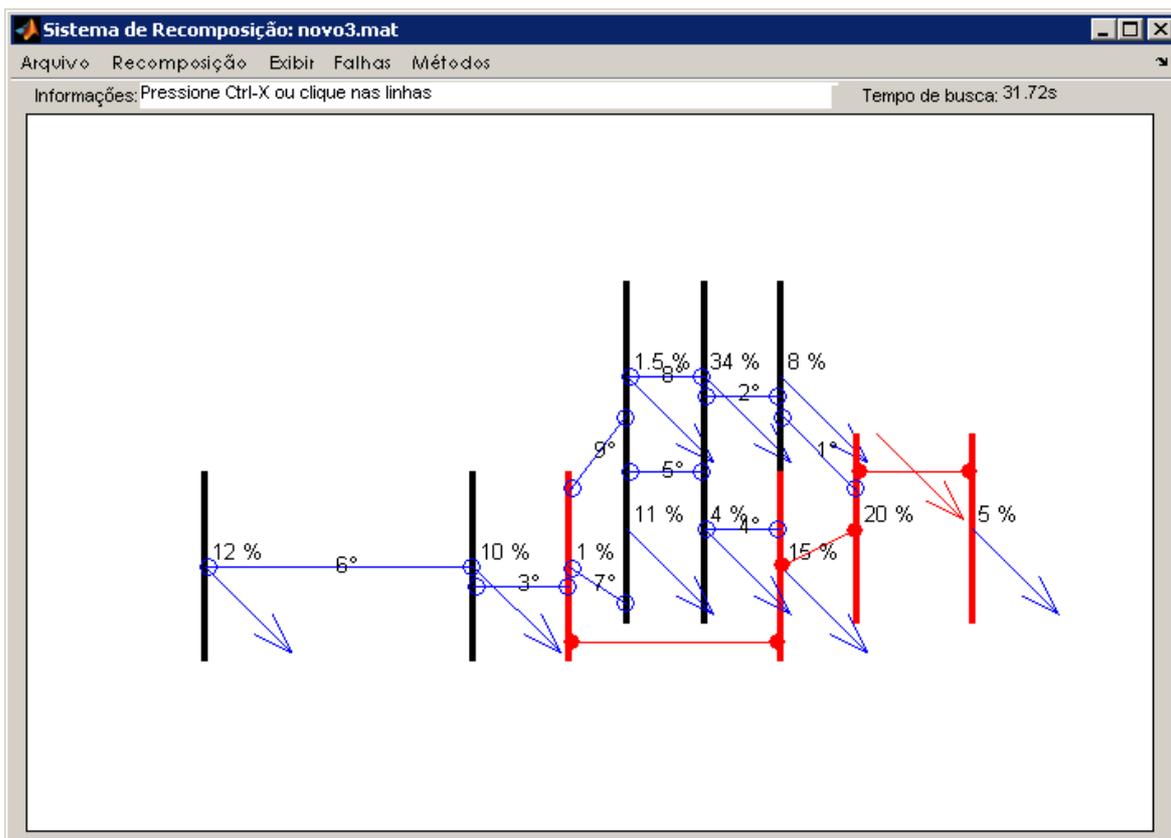


Figura B.4 – Tela módulo RECOMPOR, busca AG total – Região de Jupia até Corumbá

O resultado demonstrado abaixo corresponde ao das Figuras B.3 e B.4, aplicativo Matlab, sendo valor ótimo encontrado igual ao valor do *fitness*.

SOLUÇÕES COM BUSCA EXAUSTIVA

Tamanho do Espaço de busca: 40320

Melhor Custo: 45.88

SEQUENCIA RECOMENDADA: [5 4 1 11 7 8 3 2 9]

Tempo total de busca: 256.032 s

Fluxo com Newton

Fluxo com Alg. Genético

Tempo de processamento (s): 12.95

Valor Ótimo encontrado : 52.43

Valor obtido na geracao: 205
SEQUENCIA RECOMENDADA: [4 1 11 7 8 3 9 2]

Tempo total de busca: 268.984 s
Fluxo com Newton
Fluxo com Alg. Genético
Tempo de processamento (s): 14.28
Valor Otimo encontrado : 42.25
Valor obtido na geracao: 543
SEQUENCIA RECOMENDADA: [5 4 7 8 1 11 3 9 2]

Tempo total de busca: 283.261 s
Fluxo com Newton
Fluxo com Alg. Genético
Tempo de processamento (s): 22.83
Valor Otimo encontrado : 52.29
Valor obtido na geracao: 184
SEQUENCIA RECOMENDADA: [4 1 11 7 8 9 3 2]

Tempo total de busca: 306.157 s
Fluxo com Newton
Fluxo com Alg. Genético
Tempo de processamento (s): 25.23
Valor Otimo encontrado : 43.63
Valor obtido na geracao: 721
SEQUENCIA RECOMENDADA: [5 4 1 7 8 11 3 2 9]

Tempo total de busca: 331.422 s
Fluxo com Newton
Fluxo com Alg. Genético
Tempo de processamento (s): 28.62
Valor Otimo encontrado : 52.57

Valor obtido na geracao: 400

SEQUENCIA RECOMENDADA: [4 1 11 7 8 3 2 9]

Tempo total de busca: 360.116 s

Fluxo com Newton

Fluxo com Alg. Genético

Tempo de processamento (s): 31.72

Valor Otimo encontrado : 43.38

Valor obtido na geracao: 922

SEQUENCIA RECOMENDADA: [5 4 1 11 7 8 3 2 9]

Tempo total de busca: 391.833 s

>>

Exemplo valor da variável *fitness* em um determinado exemplo.

Na Figura B.5 é mostrado o gráfico do valor do *fitness*, em um determinado exemplo, em uma etapa da recomposição das linhas, com número máximo de gerações igual a 200. Neste exemplo a geração elite é a de número 12 valor X, com valor Y de *fitness* igual a 56,83.

A geração elite neste exemplo ocorreu no início da simulação, os demais valores obtidos não conseguiram superar a marca obtida nesta geração. Pelo critério adotado do número máximo de geração a geração de maior valor da função objetivo é considerada a elite.

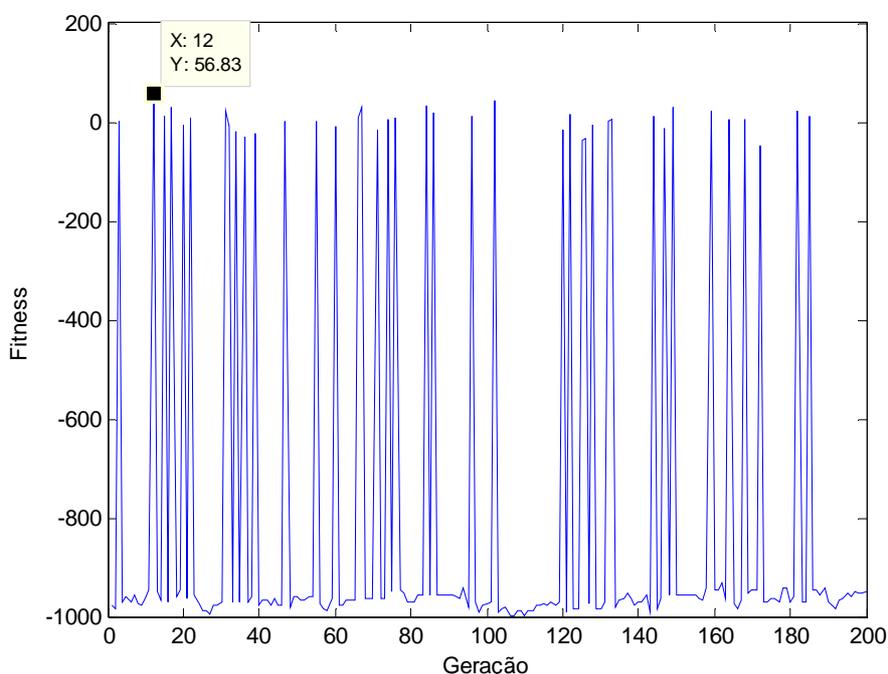


Figura B.5 – Exemplo resultado *fitness* no número máximo de gerações

Na Figura B.6 é mostrado exemplo do gráfico da geração elite para a Figura B.5, pode-se notar que a simulação convergiu rapidamente para a geração elite. Os parâmetros utilizados na simulação foram: número de indivíduos 20; taxa de cruzamento 60%; taxa de mutação 4%; número de gerações máximo igual a 200. Foi utilizado o caso 2 para esta simulação.

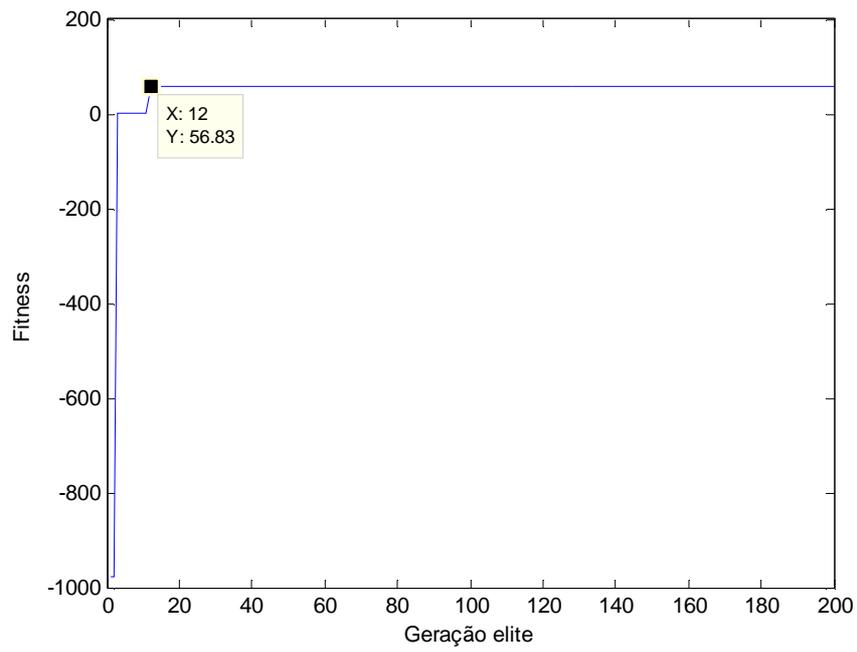


Figura B.6 – Gráfico da geração elite