

EDUARDO GAULKE

**METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DO CORTE DE
CARGA EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO UTILIZANDO
INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL E MÚLTIPLOS CRITÉRIOS**

FLORIANÓPOLIS

2007

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DO CORTE DE
CARGA EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO UTILIZANDO
INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL E MÚLTIPLOS CRITÉRIOS**

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


EDUARDO GAULKE

Florianópolis, Agosto de 2007.


METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DO CORTE DE CARGA EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO UTILIZANDO INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL E MÚLTIPLOS CRITÉRIOS

Eduardo Gaulke

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina.'



Prof. Jorge Coelho, D.Sc.
Orientador



Prof.^a. Kátia Campos de Almeida, Ph.D.
Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

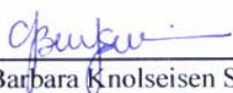
Banca Examinadora:




Prof. Jorge Coelho, D.Sc.
Presidente



Prof. C. Celso de Brasil Camargo, D. Eng.



Prof.^a. Ana Barbara Knolseisen Sambaqui, D. Eng.



Prof. Raimundo C. Ghizoni Teive, D. Eng.

*Aos meus pais,
Márcia e Nelson Gaulke,
pelo exemplo de vida e apoio
absoluto em todos os momentos!*

*À Caline,
pelo amor que venceu distâncias,
pela compreensão nas horas ausentes,
pelo constante incentivo e eterno carinho!*

*À todos meus familiares e amigos,
em especial à minha irmã, Débora Gaulke,
pela motivação e confiança em toda minha formação acadêmica!*

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Professor Jorge Coelho, pela confiança nesse trabalho, pela amizade e incentivo durante grande parte de minha formação. Agradeço por todas as oportunidades de desenvolvimento pessoal e profissional que contaram com seu integral apoio e dedicação.

Aos membros da banca, Professora Ana Bárbara Knolseisen Sambaqui, Professores Celso de Brasil Camargo e Raimundo C. Ghizoni Teive, e professores do mestrado, em especial aos professores do LabPlan, pelas contribuições no desenvolvimento desse trabalho e conhecimentos transmitidos.

Aos amigos do Laboratório de Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica – LabPlan/UFSC, pelos inestimáveis momentos de alegria e eterna amizade. Em especial aos grandes amigos da turma de mestrado 2004: Edison Aranha, Fabrício Takigawa, Leandro Aguiar e Otávio Vaz.

Aos amigos da PETROBRAS, em especial aos engenheiros Hélio Toshio Sakurai e Edmo Demescossi de Souza Júnior, que constantemente apoiaram a continuação desse trabalho.

Aos amigos do período de PET, em especial ao amigo Alexandre Zucarato, pelas contribuições no meu desenvolvimento pessoal e profissional.

À Universidade Federal de Santa Catarina pelo apoio técnico e ao CNPq pelo apoio financeiro.

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

METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DO CORTE DE CARGA EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO UTILIZANDO INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL E MÚLTIPLOS CRITÉRIOS

EDUARDO GAULKE

Agosto/2007

Orientador: Jorge Coelho, D.Sc.

Área de Concentração: Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica

Palavras-chave: corte de carga, inteligência artificial, otimização multicritério, sistemas de distribuição, qualidade de energia.

Número de Páginas: 171

O presente trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de uma metodologia para determinação do corte de carga em sistemas de distribuição, atentando para a melhoria na qualidade do fornecimento aos consumidores e para os ganhos da concessionária de distribuição. Essa metodologia é constituída por dois módulos distintos, sendo o primeiro deles responsável por determinar as tensões ótimas de despacho nas subestações com o objetivo de reduzir a demanda de energia sem infringir o limite mínimo de tensão nos pontos de carga. Já o Módulo 2 tem a finalidade de completar a solicitação de corte de carga, através do desligamento de alimentadores. Nesse segundo módulo são utilizadas ferramentas de inteligência artificial aplicadas para otimização de problemas com múltiplos critérios. Os algoritmos desenvolvidos para cada um dos módulos foram integrados em um sistema computacional, em ambiente gráfico com facilidades para execução de estudos de caso e armazenamento de informações em banco de dados. Por meio desse sistema, foram executados alguns testes com dados de sistemas reais de distribuição, que demonstraram a eficácia da metodologia desenvolvida e os ganhos conseguidos com a sua aplicação.

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

METHODOLOGY FOR DETERMINATION OF LOAD SHEDDING IN DISTRIBUTION SYSTEMS CONSIDERING ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND MULTIPLE CRITERIA

EDUARDO GAULKE

August/2007

Advisor: Jorge Coelho, D.Sc.

Area of Concentration: Electrical Energy Systems Planning.

Keywords: load shedding, artificial intelligence, multiobjective optimization, distribution systems, energy quality.

Number of Pages: 171

The objective of this work is to present the development of a methodology for the determination of load shedding in distribution systems, attempting to the improvement of the costumers' energy quality and to the utility's benefits. This methodology is composed by two modules, being the first one the responsible for the determination of the optimal voltages at the substation feeders with the objective of decreasing the energy demand without disrespecting the minimal voltage limits. The Module 2 has as objective completing the load shedding solicitation, disconnecting the feeders. This second module utilizes artificial intelligence applied to multiple criteria optimization problems. All the algorithms developed were integrated in a graphical environment with facilities for the execution of case studies and data base storage. Using this system, the methodology of load shedding has been applied to a test system, composed by a real distribution system. The results obtained demonstrate the efficacy and gains of the developed methodology.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	xix
LISTA DE TABELAS.....	xxi
LISTA DE ABREVIATURAS.....	xxiii
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA	2
1.2 OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS	4
1.2.1 <i>Objetivos Gerais</i>	4
1.2.2 <i>Objetivos Específicos</i>	5
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	5
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
2.1 QUALIDADE NO FORNECIMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA	8
2.1.1 <i>Continuidade</i>	9
2.1.1.1 Índices Globais de Continuidade.....	9
2.1.1.2 Índices Individuais de Continuidade	11
2.1.2 <i>Conformidade</i>	12
2.1.3 <i>Atenção Comercial</i>	13
2.2 METODOLOGIAS PARA O CORTE DE CARGA	14
2.3 VARIAÇÃO DA DEMANDA ELÉTRICA EM FUNÇÃO DA TENSÃO	19
2.4 FERRAMENTAS PARA OTIMIZAÇÃO DO CORTE DE CARGA	23
2.4.1 <i>Métodos Matemáticos</i>	24
2.4.2 <i>Métodos Baseados em Inteligência Artificial</i>	24
2.4.2.1 Algoritmos Genéticos	25
2.4.2.2 Redes Neurais Artificiais	25
2.4.2.3 Sistemas Especialistas.....	25
2.4.2.4 Lógica Fuzzy.....	26
2.4.3 <i>Aplicação de Ferramentas de IA no Corte de Carga</i>	26
2.4.4 <i>Otimização Multicritério</i>	27
2.4.4.1 Formulação de um Problema Multicritério	27
3. METODOLOGIA PROPOSTA	33
3.1 APRESENTAÇÃO DA METODOLOGIA DE CORTE DE CARGA.....	34
3.2 MÓDULO 1: CONTROLE DE TENSÃO NAS SUBESTAÇÕES.....	36
3.2.1 <i>Algoritmo para Redução da Necessidade de Corte de Carga</i>	37
3.2.1.1 Fluxo de Potência.....	38
3.2.2 <i>Simulador</i>	39
3.2.2.1 Cargas 100% Potência Constante.....	41
3.2.2.2 Cargas 100% Corrente Constante	42
3.2.2.3 Cargas 100% Impedância Constante.....	42
3.3 MÓDULO 2: CORTE DE CARGA VIA DESLIGAMENTO DE ALIMENTADORES	44
3.3.1 <i>Formulação Multicritério</i>	45
3.3.2 <i>Metodologia de Avaliação Multicritério</i>	48
3.3.2.1 Cálculo dos Valores Absolutos dos Critérios Considerados	49
3.3.2.2 Cálculo dos Valores por Critério para cada Alternativa de Corte	56
3.3.2.3 Cálculo da Pontuação Multicritério para cada Alternativa de Corte	57
3.3.3 <i>Otimização do Corte de Carga via SGA</i>	64
3.3.3.1 Breve Introdução sobre Algoritmos Genéticos	64
3.3.3.2 Algoritmo Genético Proposto Para o Corte de Carga	65
3.3.4 <i>Otimização do Corte de Carga via AG multicritério</i>	73

3.3.4.1	Breve Introdução sobre PMOGA.....	74
3.3.4.2	Algoritmo Genético Multicritério para o Corte de Carga	75
3.4	CORTE DE CARTA VIA BUSCA EXPLORATÓRIA EXAUSTIVA	81
4.	SIMULAÇÕES E RESULTADOS	85
4.1	DESCRIÇÃO DAS ETAPAS DE SIMULAÇÃO.....	86
4.2	SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO UTILIZADO NOS ESTUDOS.....	86
4.3	VALIDAÇÃO DAS METODOLOGIAS PARA OTIMIZAÇÃO DO CORTE DE CARGA	87
4.3.1	<i>Primeiro Estudo – Validação da Otimização via PMOGA e SGA.....</i>	<i>88</i>
4.3.1.1	Resultados da Busca Exploratória.....	90
4.3.1.2	Resultados da Otimização via PMOGA.....	91
4.3.1.3	Resultados da Otimização via SGA	94
4.3.2	<i>Segundo Estudo - Validação da Otimização via PMOGA e SGA.....</i>	<i>96</i>
4.3.2.1	Resultados da Busca Exploratória.....	97
4.3.2.2	Resultados da Otimização via PMOGA.....	97
4.3.2.3	Resultados da Otimização via SGA	99
4.4	ANÁLISE DAS CONTRIBUIÇÕES DA METODOLOGIA PROPOSTA.....	101
4.4.1	<i>Terceiro Estudo - Redução da Necessidade de Corte.....</i>	<i>101</i>
4.4.2	<i>Quarto Estudo – Vantagens da Otimização Multicritério</i>	<i>106</i>
5.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	111
5.1	CONCLUSÕES	112
5.2	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	114
APÊNDICE A – FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA APOIO À DECISÃO DE CORTE DE CARGA		115
A.1	APRESENTAÇÃO GERAL DO PROGRAMA COMPUTACIONAL.....	116
A.2	MÓDULO 1: CONTROLE DE TENSÃO NAS SUBESTAÇÕES.....	125
A.3	MÓDULO 2: CORTE DE CARGA VIA DESLIGAMENTO DE ALIMENTADORES	126
ANEXO A – BASE DE DADOS UTILIZADA NAS SIMULAÇÕES.....		137
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		165

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Representação gráfica das funções-objetivo f_1 e f_2	29
Figura 2.2 – Identificação da Fronteira de Pareto.....	30
Figura 3.1 – Fluxograma da metodologia para corte de carga.....	35
Figura 3.2 – Fluxograma do algoritmo para redução da necessidade de corte de carga.....	38
Figura 3.3 - Sistema 17 barras.....	40
Figura 3.4 - Redução no consumo (cargas 100% potência constante).....	41
Figura 3.5 - Redução no consumo (cargas 100% corrente constante).....	42
Figura 3.6 - Redução no consumo (cargas 100% impedância constante).....	43
Figura 3.7 – Codificação do cromossomo para aplicação no AG.....	49
Figura 3.8 – Estrutura arbórescente para a pontuação multicritério	58
Figura 3.9 – Função de valor para FolgaDEC e FolgaFEC	60
Figura 3.10 – Função de valor para FolgaDIC e FolgaFIC	61
Figura 3.11 – Função de valor para PrioridadeCorte	62
Figura 3.12 – Função de valor para DeltaCorte.....	63
Figura 3.13 – Algoritmo para otimização do desligamento de alimentadores via SGA.....	66
Figura 3.14 – Exemplo de <i>crossover</i> ponto único	71
Figura 3.15 – Exemplo de mutação	71
Figura 3.16 – Exemplo de relatório de otimização.....	73
Figura 3.17 - Algoritmo para otimização do desligamento de alimentadores via PMOGA	76
Figura 3.18 - Algoritmo de busca exploratória exaustiva.....	83
Figura 4.1 – Características do sistema elétrico para os estudos de validação da otimização	89
Figura 4.2 – Taxas de substituição utilizadas na validação das metodologias de otimização	89
Figura 4.3 – Valor da máxima pontuação a cada geração (PMOGA - primeiro estudo).....	93
Figura 4.4 – Número de soluções de 1ª ordem a cada geração (PMOGA - primeiro estudo).....	93
Figura 4.5 – Valor da máxima pontuação a cada geração (PMOGA - segundo estudo)	99
Figura 4.6 – Número de soluções de 1ª ordem a cada geração (PMOGA - segundo estudo).....	99
Figura 4.7 – Valor da pontuação máxima e média a cada geração (SGA – segundo estudo).....	101
Figura 4.8 – Características do sistema elétrico para o terceiro estudo	102
Figura 4.9 – Ajuste proposto pelo Módulo 1 para o terceiro estudo.....	104
Figura A.1– Tela de abertura do programa.....	116
Figura A.2 – Gerenciamento da base de dados.....	117
Figura A.3 – Janela para seleção da abrangência do corte de carga	118
Figura A.4 – Janela para visualização da tabela de condutores	119
Figura A.5 – Configuração do modelo multicritério	119
Figura A.6 – Edição dos dados do sistema elétrico carregado	120
Figura A.7 – Informações sobre o sistema elétrico carregado.....	122
Figura A.8 – Solicitação de corte de carga.....	123
Figura A.9 – Informações sobre o corte de carga.....	124
Figura A.10 – Exemplo de relatório com as informações sobre o corte de carga.....	125
Figura A.11 – Limite de tensão para o Módulo 1	126
Figura A.12 – Resultados do módulo de redução da necessidade de corte de carga (Módulo 1)	126
Figura A.13 – Janela para execução da otimização via PMOGA.....	127
Figura A.14 – Parâmetros do AG e escolha do método de busca.....	128
Figura A.15 – Resultado do processo de busca	130
Figura A.16 – Barra de ferramentas e aba para análise gráfica	131
Figura A.17 – Janela com configurações do PMOGA e da função multicritério	131
Figura A.18 – Janela de análise gráfica do PMOGA.....	133
Figura A.19 – Janela para execução da otimização via SGA	134
Figura A.20 – Janela com configurações do SGA e da função multicritério.....	135
Figura A.21 – Janela de análise gráfica do SGA	135

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Pontos de entrega em tensão nominal superior a 1 kV e inferior a 69 kV.....	13
Tabela 3.1 – Dados do sistema 17 barras	40
Tabela 3.2 – Valores de cada critério por alimentador e para a alternativa de corte sugerida	56
Tabela 4.1 – Resultados da busca exploratória para o primeiro estudo	90
Tabela 4.2 – Resultados da otimização via PMOGA para o primeiro estudo.....	92
Tabela 4.3 – Resultados da otimização via SGA para o primeiro estudo	95
Tabela 4.4 – Resultados da busca exploratória para o segundo estudo	97
Tabela 4.5 – Resultados da otimização via PMOGA para o segundo estudo.....	98
Tabela 4.6 – Resultados da otimização via SGA para o segundo estudo	100
Tabela 4.7 – Constantes para a modelagem da carga e fator de demanda para o terceiro estudo.....	102
Tabela 4.8 – Ordenação crescente dos alimentadores de acordo com a prioridade de carga.....	107

LISTA DE ABREVIATURAS

AG	Algoritmo Genético
AL	Alimentador de Distribuição
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
COD	Centro de Operação da Distribuição
DEC	Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
DIC	Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora
DMIC	Duração Máxima de Interrupção Contínua por Unidade Consumidora
ENS	Energia Não Suprida
ERAC	Esquemas Regionais de Alívio de Carga
FEC	Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
FIC	Frequência de Interrupção Individual por Unidade Consumidora
IA	Inteligência Artificial
PMOGA	<i>Pareto Multiobjective Genetic Algorithm</i>
PVE	Ponto de Vista Elementar
PVF	Ponto de Vista Fundamental
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>
SGA	<i>Simple Genetic Algorithm</i>
SE	Subestação de Distribuição



CAPÍTULO

1

INTRODUÇÃO

Neste capítulo inicial é feita uma breve apresentação do problema de corte de carga em sistemas de distribuição de energia elétrica, seguida pela descrição dos objetivos gerais e específicos deste trabalho. A organização dos capítulos seguintes também é apresentada ao final desta seção.

1.1 Apresentação do Problema

As redes de distribuição de energia elétrica são, na maioria dos casos, o elo final da conexão entre os sistemas de potência e os consumidores. Assumindo sua importância, as empresas distribuidoras de energia elétrica têm sido incentivadas a melhorar continuamente a qualidade do serviço prestado aos seus clientes, seja pelo rigor das metas de continuidade definidas pelo órgão regulador¹ ou pela busca da excelência no atendimento aos seus consumidores, colocando-se à frente das outras distribuidoras (Camargo, Coelho, Gaulke *et al.*, 2005). Entretanto, se houver a necessidade de diminuir a demanda de energia com o objetivo de atender restrições de segurança elétrica das redes, usualmente essa redução ocorre por meio de ações de desligamento nos sistemas de distribuição (Silva, Cassula, Billinton *et al.*, 2001), podendo comprometer a qualidade da energia distribuída. Esse procedimento de alívio do carregamento é chamado de corte de carga.

Comumente as restrições de segurança implicam no monitoramento do nível de tensão e frequência em algumas barras do sistema, gerando ações de chaveamento automatizadas nos sistemas de transmissão e distribuição, sem a interferência de um operador.

Esses sistemas automatizados, quando presentes nas redes de distribuição, podem ser chamados de *esquemas regionais de alívio de carga (ERAC)*. A sua atuação ocorre por meio de relés que detectam variações no módulo e frequência da onda de tensão e estão configurados para desconectar determinados alimentadores, caso essas grandezas encontrem-se em faixas pré-determinadas.

O corte de carga na distribuição é efetuado, de modo geral, na ocorrência de duas situações características: contingências na própria rede de distribuição ou redução da disponibilidade do sistema de suprimento (geração e transmissão), que pode ocorrer em função de contingências ou racionamento de energia.

¹ No Brasil, é função da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) regular e fiscalizar o setor elétrico. A ANEEL é uma autarquia federal vinculada ao Ministério de Minas e Energia (MME).

A primeira situação é resultante de faltas que acarretam a perda de alimentadores, ou parte deles, nos sistemas de distribuição. Nesse caso, procura-se através de operações de chaveamento alimentar o maior carregamento possível por meio de rotas alternativas, que podem não ter capacidade suficiente para conduzir toda energia demandada. Nessas condições anormais de carregamento, o corte de carga deve ser a última opção do operador, sendo executado apenas quando as condições do sistema não permitem que toda demanda seja atendida através da reconfiguração da rede.

Faltas nos sistemas de geração ou transmissão são outro motivo que podem implicar no corte de carga. Nessas situações o problema é devido à falta de suprimento nas subestações de distribuição e conseqüente déficit de potência para atender a solicitação de demanda de todos os consumidores.

Sob condições severas, os esquemas automáticos descritos acima podem atuar de forma autônoma, quando detectarem variações não toleradas nas variáveis de controle (módulo e frequência da tensão). Nesses casos, os alimentadores desconectados serão sempre os mesmos, para cada zona de corte. Além disso, para determinação de tais zonas, tipicamente o único critério levado em conta é a prioridade das cargas conectadas em cada alimentador. Entretanto, há outros critérios que podem ser considerados na tarefa de optar pelo melhor corte de carga, como por exemplo, alguns indicadores de qualidade de energia e redução da energia não suprida (ENS).

Já no caso de solicitações programadas², usualmente os planejadores e operadores de sistemas de distribuição se utilizam de suas experiências passadas e estudos operacionais realizados periodicamente para tomada de decisões, que envolvem o desligamento forçado de consumidores (corte de carga).

Em ambas as situações, a política empregada pela distribuidora para executar essa redução no carregamento tem influência direta nos índices de continuidade da rede e custos decorrentes da interrupção.

Contudo, com o notável avanço dos sistemas micro-processados, vivenciado nas últimas décadas, o volume de informações disponíveis para a tomada de decisões cresceu

consideravelmente, possibilitando que novos critérios³ sejam considerados também nos estudos de corte de carga.

Porém, dada a enorme quantidade de dados e seu comportamento dinâmico no tempo, bem como os diversos critérios envolvidos na solução do problema, há a necessidade do processamento computacional dessas informações, buscando a melhor alternativa de corte em um tempo factível para operação *on-line* das redes de distribuição.

Dessa maneira, torna-se interessante o estudo de técnicas para otimização multicritério aplicadas a modelos computacionais para execução do corte de carga, contribuindo tanto na melhoria do atendimento aos clientes por parte da concessionária, quanto no seu próprio retorno financeiro e posição de vanguarda frente a outras distribuidoras.

Focado neste tema, o presente trabalho apresenta uma metodologia que permite selecionar os alimentadores de distribuição que devem ser desconectados nos casos de falta descritos anteriormente, por meio de uma abordagem multicritério. Essa proposta tem aplicação tanto no caso do desligamento automático (via ERAC), uma vez que permite a realização de estudos que conduzam à melhor classificação dos alimentadores nas zonas de desligamento, quanto para o caso de solicitações programadas de corte de carga.

1.2 Objetivos Gerais e Específicos

1.2.1 Objetivos Gerais

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver uma metodologia para otimização multicritério das ações de corte de carga em sistemas de distribuição de energia elétrica. Essa metodologia será aplicada em uma ferramenta computacional para auxiliar nas etapas

² Entende-se por solicitações programadas aquelas em que o operador será o responsável pela execução das manobras na rede, havendo um tempo hábil para a realização dos estudos de corte de carga. Tipicamente na ordem de poucos minutos.

³ Como exemplo podem-se citar os indicadores de continuidade DEC e FEC que variam a cada desligamento na rede. Esses indicadores serão definidos no Capítulo 2.

de operação e planejamento de sistemas de distribuição, quando das solicitações de corte de carga.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Desenvolver e implementar computacionalmente uma metodologia responsável por reduzir a necessidade de corte de carga via controle de tensão nas subestações;
- Desenvolver e implementar computacionalmente uma metodologia de otimização multicritério responsável por determinar quais alimentadores de distribuição devem ser desligados para atender a necessidade de corte de carga;
- Implementar um processo de busca exploratória exaustiva, considerando os mesmos critérios usados na otimização multicritério, para possibilitar a validação da metodologia de corte de carga proposta;
- Integrar os módulos citados acima em um ambiente computacional de interface amigável, contando com a aplicação de banco de dados para estudo de sistemas baseados em redes de distribuição reais.

1.3 Organização do Trabalho

Para facilitar a compreensão dos assuntos abordados, este trabalho está organizado da seguinte forma.

O Capítulo 2 compõe-se da revisão bibliográfica de temas necessários para a elaboração da metodologia de corte de carga proposta, tais como: quesitos ligados à qualidade no fornecimento de energia elétrica, variação da demanda elétrica em função da tensão, metodologias apresentadas na literatura para o corte de carga, técnicas de otimização usando inteligência artificial e otimização multicritério.

O Capítulo 3 apresenta a metodologia desenvolvida para otimização multicritério das ações de corte de carga em sistemas de distribuição de energia elétrica. São descritos os módulos para regulação de tensão nas subestações objetivando a redução da necessidade

de corte, assim como os módulos para otimização do corte de carga por meio do desligamento de alimentadores.

Para validar a metodologia e a ferramenta computacional desenvolvidas, o Capítulo 4 descreve alguns estudos de caso de corte de carga em sistemas de distribuição. Nesse capítulo são evidenciadas as características relevantes da metodologia proposta.

O Capítulo 5 apresenta as conclusões do presente trabalho, bem como as recomendações para trabalhos futuros.

Para completar a documentação descritiva do trabalho, o apêndice A apresenta a ferramenta computacional desenvolvida com base na metodologia proposta no Capítulo 3, que tem o objetivo de auxiliar nas etapas de operação e planejamento de sistemas de distribuição, quando das solicitações de corte de carga.



CAPÍTULO

2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Com o objetivo de apresentar conceitos e procedimentos necessários ao desenvolvimento do trabalho proposto, este capítulo consiste em uma revisão bibliográfica de temas relacionados à qualidade no fornecimento de energia elétrica, variação da demanda elétrica em função da tensão, metodologias para o corte de carga, otimização utilizando técnicas de inteligência artificial e otimização multicritério.

2.1 Qualidade no Fornecimento de Energia Elétrica

Em toda cadeia envolvida no fornecimento de energia aos consumidores, a distribuição é a etapa que mais impacta na qualidade do produto/serviço energia elétrica, principalmente por ser o setor onde ocorre a maior parte das faltas e das perdas de energia do sistema (Coelho e Parada, 2000).

O **produto** energia elétrica diz respeito especificamente à energia que é entregue nos pontos de carga, de forma a suprir a demanda do mercado consumidor. Já como **serviço**, estão subentendidas as ações necessárias para que o produto energia elétrica possa atender a demanda, passando pela geração, transmissão e distribuição (Knolseisen, 2001).

Segundo Coelho (2000), a qualidade do serviço é o conjunto de atributos e propriedades técnicas e não técnicas, que define as condições em que devem ser baseadas as atividades do setor elétrico, e que deve regular o desempenho da concessionária no fornecimento da eletricidade. Esses atributos e propriedades são refletidos através de valores numéricos e índices.

A preocupação com a qualidade não é fator novo nas concessionárias de energia, mas a reestruturação do sistema elétrico, e sua conseqüente regulamentação, fez com que sua importância aumentasse, tanto para as concessionárias, quanto para os clientes (Parada, 1999).

De maneira geral, pode-se analisar a qualidade nos sistemas elétricos de distribuição perante três aspectos: Continuidade, Conformidade e Atenção Comercial.

A Continuidade está relacionada com o fornecimento ininterrupto de energia, sendo abordados aspectos relacionados à duração e frequência das interrupções. A Conformidade está ligada à forma de onda entregue ao consumidor, abordando critérios como nível de tensão, desequilíbrio de fases (que ocasionam tensões de seqüência negativa e zero), perturbações e interferências nos sistemas de comunicação. A Atenção Comercial por sua vez, engloba os aspectos que dizem respeito ao relacionamento da empresa com o cliente, sendo analisadas as queixas de consumidores, faturamento, tempo médio de atendimento ao consumidor, além de outros temas afins (Gaulke, 2001).

2.1.1 Continuidade

Conforme Resolução N°. 177/2005 (Aneel, Res. N°. 177/2005), a continuidade dos serviços públicos de energia elétrica deverá ser supervisionada, avaliada e controlada por meio de indicadores coletivos que expressem os valores vinculados a conjuntos de unidades consumidoras, bem como indicadores individuais associados a cada unidade consumidora e ponto de conexão.

Um conjunto de unidades consumidoras abrange uma área geográfica contígua que é atendida pela concessionária, sendo geralmente considerado o município como um todo (Sperandio, 2004). Para cada conjunto, a empresa tem metas⁴ a cumprir, bem como também são exigidos da concessionária indicadores globais para toda área de concessão. No futuro espera-se poder exigir os mesmos índices de qualidade de todas as empresas brasileiras, garantindo assim uma uniformidade no território nacional (Costa, 2001).

Existem duas categorias de índices relacionados à continuidade: índices globais e índices individuais. Os índices globais refletem o comportamento médio do sistema e são úteis para fazer a gestão interna de investimentos. Os índices individuais medem a qualidade do atendimento a cada unidade consumidora.

A concessionária de distribuição deverá apurar mensalmente os indicadores de continuidade considerando as interrupções com duração maior ou igual a 3 (três) minutos (Aneel, Res. N°. 177/2005).

2.1.1.1 Índices Globais de Continuidade

Podem ser calculados para um alimentador, subestação, conjunto ou para toda a empresa. Os índices globais refletem o número (FEC) e a duração média das interrupções (DEC).

O DEC, índice brasileiro para a duração equivalente de interrupção por unidade consumidora, exprime o espaço de tempo que, em média, cada cliente do sistema considerado ficou privado do fornecimento de energia elétrica no período de observação. Por sua vez, o FEC, índice brasileiro para a frequência equivalente de interrupção por

⁴ Segundo a Resolução ANEEL N°. 024/2000, as metas de continuidade são os valores máximos estabelecidos para os indicadores de continuidade, a serem observados com periodicidade mensal, trimestral e anual, vinculados ao ciclo da respectiva revisão periódica das tarifas, conforme resolução específica.

unidade consumidora, representa o número de interrupções ocorridas, em média, no período de observação, em cada unidade consumidora do conjunto considerado (Aneel, Res. Nº. 024/2000).

Para efeitos de apuração, esses indicadores devem ser calculados de acordo com as equações abaixo (Aneel, Res. Nº. 024/2000).

$$DEC = \frac{\sum_{i=1}^k Ca(i) * t(i)}{Cc} \quad (2.1)$$

$$FEC = \frac{\sum_{i=1}^k Ca(i)}{Cc} \quad (2.2)$$

Onde:

DEC : Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora, expressa em horas e centésimos de hora;

FEC : Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora, expressa em número de interrupções e centésimos do número de interrupções;

Ca(i) : Número de unidades consumidoras interrompidas em um evento (*i*), no período de apuração;

t(i) : Duração de cada evento (*i*), no período de apuração;

i : Índice de eventos ocorridos no sistema que provocam interrupções em uma ou mais unidades consumidoras;

k : Número máximo de eventos no período considerado;

Cc : Número total de unidades consumidoras no conjunto considerado, no final do período de apuração.

Conforme a Resolução Nº. 177/2005 (Aneel, Res. Nº. 177/2005), a partir de 2007, as concessionárias de distribuição deverão enviar à ANEEL os valores apurados dos indicadores DEC e FEC, segregando os valores decorrentes de eventos ocorridos na sua rede elétrica e os oriundos de fatos externos ao seu sistema de distribuição.

2.1.1.2 Índices Individuais de Continuidade

Expressam as medidas de continuidade para cada unidade consumidora, computando o número de interrupções (FIC) e a duração (DIC) de cada evento no ponto de conexão⁵ do consumidor. Os índices individuais são um avanço importante na regulamentação da qualidade do serviço, pois enfocam o problema sob o ponto de vista do consumidor de eletricidade (Costa, 2001).

O DIC, duração de interrupção individual por unidade consumidora ou por ponto de conexão, indica o intervalo de tempo em que, no período de observação, em uma unidade consumidora ou ponto de conexão, ocorreu descontinuidade na distribuição de energia elétrica. O FIC, índice brasileiro para frequência de interrupção individual por unidade consumidora ou por ponto de conexão, representa o número de interrupções ocorridas, no período de observação, em cada unidade consumidora ou ponto de conexão. Por sua vez o DMIC, duração máxima de interrupção contínua por unidade consumidora ou por ponto de conexão, indica o tempo máximo de interrupção contínua da energia elétrica em uma unidade consumidora ou ponto de conexão (Aneel, Res. N°. 024/2000).

Para obtenção dos índices individuais, conforme as equações abaixo, devem ser monitoradas as interrupções sofridas por cada consumidor (Aneel, Res. N°. 024/2000).

$$DIC = \sum_{i=1}^n t(i) \quad (2.3)$$

$$FIC = n \quad (2.4)$$

$$DMIC = t(i) \max \quad (2.5)$$

Onde:

DIC : Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora, expressa em horas e centésimos de hora;

FIC : Frequência de Interrupção Individual por Unidade Consumidora, expressa em número de interrupções;

⁵ Entende-se por Ponto de Conexão, o equipamento ou conjunto de equipamentos que se destinam a estabelecer a conexão elétrica na fronteira entre os sistemas de dois ou mais Agentes (Aneel, Res. N°. 024/2000).

i : Índice de interrupções da unidade consumidora, no período de apuração, variando de 1 a n ;

n : Número de interrupções da unidade consumidora considerada, no período de apuração;

$t(i)$: Tempo de duração da interrupção (i) da unidade consumidora considerada, no período de apuração.

$t(i)_{max}$: Valor correspondente ao tempo da máxima duração de interrupção(i), no período de apuração, verificada na unidade consumidora ou no ponto de conexão considerado, expresso em horas e centésimos de horas.

2.1.2 Conformidade

A conformidade pode ser entendida como a capacidade do sistema elétrico de fornecer aos seus consumidores energia com tensão e frequência isentas de distorções e flutuações harmônicas. Sabe-se que uma onda ideal de tensão deve ter a forma senoidal e frequência de 60 Hz, para o caso brasileiro. A amplitude deve ser especificada e invariável, além do que deve existir simetria entre as tensões de fase, no caso de sistemas trifásicos. Sabe-se, porém, que num sistema real estas especificações não são integralmente realizáveis. Existem muitos fenômenos que atuam no sentido de perturbar a onda original, como por exemplo: cintilação ou *flicker*, conteúdo de harmônicos, desequilíbrio de tensão, depressão de tensão e outros (Coelho, Costa e Gaulke, 2000). Entretanto no Brasil, a qualidade da energia com respeito à conformidade é regulamentada apenas sob o aspecto dos níveis de tensão. A Resolução ANEEL N°. 505/2001 (Aneel, Res. N°. 505/2001) e sua atualização, Resolução N°. 676/2003 (Aneel, Res. N°. 676/2003), estabelecem as disposições relativas à conformidade dos níveis de tensão de energia elétrica em regime permanente⁶.

⁶ Segundo a Resolução N°. 505/2001, entende-se por Regime Permanente, o intervalo de tempo da leitura de tensão, onde não ocorrem distúrbios elétricos capazes de invalidar a leitura, definido como sendo 10 (dez) minutos.

Neste trabalho de dissertação, o corte de carga envolverá o desligamento de alimentadores de distribuição operando em nível de média tensão⁷. Dessa maneira, apresentam-se abaixo as faixas de variação da tensão, de acordo com a classificação da tensão de atendimento, para o nível de média tensão (Aneel, Res. Nº. 676/2003).

Tabela 2.1 - Pontos de entrega em tensão nominal superior a 1 kV e inferior a 69 kV

<i>Classificação da Tensão de Atendimento (TA)</i>	<i>Faixa de variação da Tensão de Leitura (TL) em relação à Tensão Contratada (TC)</i>
Adequada	$0,93 TC \leq TL \leq 1,05 TC$
Precária	$0,90 TC \leq TL < 0,93 TC$
Crítica	$TL < 0,90 TC$ ou $TL > 1,05 TC$

2.1.3 Atenção Comercial

Este quesito está relacionado com a atenção dada pela empresa aos clientes, podendo-se citar o atendimento às reclamações dos consumidores. No Brasil, o órgão regulador estipula prazos máximos que devem ser respeitados para execução de algumas tarefas, com por exemplo, o tempo para ligar ou religar um consumidor à rede.

Outra ferramenta de avaliação e controle de desempenho da distribuidora são as pesquisas de opinião pública. O procedimento para elaboração dessas pesquisas é parte integrante do contrato de concessão de cada concessionária com a ANEEL, devendo ser realizadas anualmente.

A pesquisa, denominada de IASC⁸, deve ser feita diretamente na área de serviço da empresa, entrevistando uma amostra representativa do número e da diversidade de consumidores. As perguntas devem considerar aspectos técnicos e comerciais, visando coletar dados referentes à satisfação do consumidor com relação a parâmetros como: continuidade do fornecimento da energia elétrica, qualidade do fornecimento (aspectos voltados à onda de tensão), qualidade do atendimento comercial, serviços prestados, imagem da concessionária, entre outros (Coelho, Costa e Gaulke, 2000).

⁷ Atendimento em Média Tensão: unidade consumidora atendida em tensão nominal maior que 1 kV e menor que 69 kV (Aneel, Res. Nº. 505/2001).

⁸ Índice ANEEL de Satisfação do Consumidor

Os resultados devem ser passados à ANEEL que poderá comparar o desempenho entre as empresas do mercado. Destas pesquisas obtêm-se os índices de satisfação do consumidor.

Atentando para essas questões abordadas, a busca pela qualidade no fornecimento de energia elétrica, exige por parte das empresas concessionárias um planejamento mais elaborado do seu sistema de distribuição. Só assim consegue-se alcançar o atendimento da crescente demanda com o nível de qualidade necessário nos serviços, buscando sempre a minimização dos custos globais (Coelho, 1996).

É importante lembrar que segundo a Resolução ANEEL N°. 264/1998 (Aneel, Res. N°. 264/1998), os consumidores ligados após 08 de julho de 1995, cuja demanda contratada totalize no mínimo 3 MW, em qualquer segmento horosazonal e atendidos em qualquer tensão, podem optar pela compra de energia junto a qualquer concessionário, permissionário ou autorizado do sistema interligado.

Com isso torna-se ainda mais importante para a concessionária a preocupação com a excelência no atendimento aos seus clientes, uma vez que boa parte deles são potencialmente consumidores livres e podem optar pelo supridor de energia.

2.2 Metodologias para o Corte de Carga

A maioria das publicações que tratam do tema corte de carga estão relacionadas com o alívio de carregamento através do monitoramento da magnitude e frequência da tensão das barras do sistema, gerando ações de chaveamento automatizadas nos sistemas de transmissão e distribuição, sem a interferência de um operador. Tipicamente, as atuações automatizadas de corte de carga visam manter os critérios de estabilidade do sistema elétrico. Nessa linha se enquadram as publicações de Moors, Lefebvre e Cutsem (2000), Perumal e Ying (2004), Lu e Kao (2005), Parniani e Nasri (2006), Mihirig, Nguyen e Allen (Mihirig, Nguyen e Allen, 2006) e Fu e Wang (2007).

Além desses, pode-se citar, por exemplo, o esquema automático de corte de carga da PNM⁹, apresentado por Mechenbier, Ellis e Curter (2004). Esse esquema busca evitar colapsos de tensão no sistema de transmissão, efetuando o desligamento automático de alimentadores na distribuição.

Outro caso é apresentado em Côté, Côté e Lacroix (2001), que descreve um sistema programável de corte de carga usado na Hydro-Québec¹⁰. O esquema em questão atua de forma automatizada em subestações telecomandadas, por meio do processamento digital de informações coletadas na rede, dentre elas as taxas de variação da magnitude e frequência das tensões nos pontos de observação.

Também em Echavarren, Lobato, Rouco *et al.* (2003) e Lopes, B. I. L. e Souza (2003) são apresentadas metodologias para corte de carga preocupando-se com o colapso de tensão nos sistemas de potência. Especificamente na primeira referência, os autores propõem um algoritmo de otimização para determinar o montante de corte de carga necessário para aumentar a margem de carga para colapso de tensão. A função objetivo consiste na minimização da demanda desconectada considerando as restrições de balanço de potência e limites de geração.

Há também publicações bastante inovadoras para execução de corte de carga em sistemas industriais, focadas para a automatização das ações de desligamento e minimização das perturbações no sistema elétrico. Como por exemplo, o artigo de Shokooh, Dai, Shokooh *et al.* (2005), que apresenta uma aplicação envolvendo esquemas digitais para captura e processamento de dados de sistemas industriais, procurando antecipar os eventos onde há necessidade de corte de carga.

Nos sistema de potência, de maneira geral, nas solicitações de corte de carga, é necessário analisar e executar, em um curto período de tempo, uma série de operações de chaveamento. Muitas vezes essas ações, ou a programação da lógica de desligamento nos sistemas automatizados, são dependentes da experiência que possui o engenheiro de

⁹ A PNM (*Public Service Company of New México*) é uma empresa norte americana de serviços públicos provedora de gás e eletricidade.

¹⁰ A Hydro-Québec é uma empresa distribuidora, transmissora e produtora de energia elétrica na América do Norte.

operação, buscando usualmente a minimização da demanda cortada e a garantia do atendimento aos serviços essenciais¹¹.

Além desses dois objetivos, algumas técnicas encontradas na literatura mostrada na seqüência, priorizam critérios como: duração das operações com chaveamento, custo da interrupção para os consumidores, metas de continuidade cobradas pelo órgão regulador, controle de tensão e de níveis de carregamento, perdas elétricas e outros.

Já em 1968, Hajdu, Peschon, Tinney *et al.* (1968) propuseram uma metodologia para corte de carga em um sistema de potência devido a uma falta severa, visando minimizar a redução de demanda cortada. Esse problema de minimização do corte, dado um conjunto de contingências, foi formulado como um problema de otimização estática, sujeito a restrições operacionais e limitações dos equipamentos do sistema.

Um modelo mais sofisticado foi apresentado por Subramanian (1971). Esse novo modelo foi combinado com técnicas de programação linear para solucionar o problema de minimização do corte de carga.

A preocupação com o tempo para execução das operações de corte de carga foi abordada por Adibi e Thorne (1988). Nesse trabalho foi apresentado um esquema para o corte de carga local devido a sobrecargas em equipamentos de uma rede de transmissão subterrânea. Basicamente, o algoritmo apresentado opera em dois estágios: inicialmente executa um corte rápido de carga para proteger os equipamentos em sobrecarga e na seqüência procura efetuar a restauração parcial do sistema, sem comprometer os limites de ampacidade dos trechos e perfil de tensão nas barras.

Nessas três últimas abordagens citadas, o custo que a interrupção de energia representa para os consumidores não é considerado no processo decisório, estando focadas na minimização da carga cortada e rapidez na identificação de estratégias de atuação.

Buscando levar em conta os aspectos financeiros decorrentes do desligamento de demanda sem prévia comunicação, em Wang, P. e Billinton (2000) e Wangdee e Billinton (2004) foi descrita uma técnica de corte de carga na qual a função objetivo sugere a

¹¹ Segundo (Aneel, Res. Nº. 024/2000), define-se por serviço essencial, o serviço ou atividade caracterizado como de fundamental importância para a sociedade.

desconexão de cargas preocupada com a minimização dos custos que a interrupção de energia elétrica causa para os consumidores.

Uma condição básica para a aplicação dessa proposta em sistemas de distribuição é o desenvolvimento de modelos que possam valorar o custo de interrupção para diferentes classes de consumidores. Essa é a etapa de maior dificuldade e que pode ocasionar muita incerteza. Diferentes maneiras de realizar este levantamento podem ser aplicadas, exigindo o cuidado de não inserir medidas tendenciosas. O trabalho de Wang, P. e Billinton (2000) utiliza no processo de otimização uma estimativa para os custos de interrupção de diversas classes de consumidores, elaborada pela universidade de Saskatchewan em parceria com concessionárias canadenses.

O corte de carga em sistemas de distribuição não necessariamente deve procurar apenas contemplar o menor custo de interrupção para os consumidores e a minimização da demanda desconectada. Cada empresa deve avaliar que critérios melhor se enquadram nas necessidades de cada região em sua área de concessão.

Outro aspecto que pode ser inserido na função objetivo para indicação dos alimentadores candidatos ao corte de carga, é a observação do atendimento às metas de continuidade (DEC e FEC), estabelecidas pelo órgão regulador. Muitas vezes, pode ser vantajoso para a concessionária poupar do desligamento consumidores que estão conectados à alimentadores com altas taxas de duração e frequência de falhas, evitando penalizações pelo não cumprimento das metas.

Além disso, a degradação dos indicadores de continuidade pode gerar insatisfação por parte dos clientes e comprometer a imagem na concessionária. Conforme já comentado anteriormente, a busca pela qualidade no atendimento deve ser alvo de constante preocupação das empresas distribuidoras, principalmente no tocante à possibilidade dos consumidores livres optarem por outra empresa na compra de energia.

Focado neste tema, Billinton e Satish (1996) investigaram o efeito do corte de carga rotativo nos índices de confiabilidade de sistemas de potência. Esse tipo de corte baseia-se na utilização de diferentes alternativas de desligamento para executar o corte solicitado, ou seja, variar a escolha dos alimentadores para corte. O resultado mostra que diferentes

procedimentos de corte de carga podem ter impactos consideráveis nos índices de confiabilidade do sistema.

Também nessa linha de pesquisa, Silva, Cassula *et al.* (2001) apresentam uma metodologia para avaliar o desempenho de um sistema de distribuição, considerando diferentes prioridades para o corte de carga. Mostra-se que pode haver uma grande variação nas soluções dentre as distintas estratégias possíveis para o corte. Dependendo das características dos sistemas integrados de geração, transmissão e distribuição, pode-se optar por uma estratégia que não conduza ao menor custo de interrupção, mas que prioriza outro parâmetro, como a frequência e duração da falha, vitais para o funcionamento de certos processos industriais.

O controle de tensão e níveis de carregamento da rede são dois outros critérios que podem compor a função objetivo na busca pelas cargas a serem desconectadas do sistema de distribuição. Levando em consideração esses dois critérios, o corte de carga é realizado nos pontos do sistema que reduzem o carregamento nos componentes e melhoram o perfil de tensão ($\Delta V_i / \Delta P_i$) ao longo dos alimentadores. Com a melhoria nos níveis de carregamento dos alimentadores, pode-se conseguir a redução das perdas elétricas, além do aumento da vida útil dos equipamentos da rede.

Em Rao e Rao (2003) é proposto um algoritmo para o corte de carga em sistemas radiais, o que é característico de sistemas de distribuição. Esse algoritmo, utilizado nos casos em que o sistema opera fora dos limites de capacidade e níveis de tensão, sugere um método que procura eliminar seqüencialmente os alimentadores terminais mais carregados até que, em todos os trechos, não haja mais violações de capacidade de carregamento. Com esses cortes, também o perfil de tensão sofre melhorias. No passo seguinte, é feita uma verificação ao longo da rede eliminando outras cargas com o intuito de corrigir os níveis de tensão. Por fim, procura-se identificar possíveis cargas a serem restauradas, sem que sejam percebidas violações operativas.

É importante ainda destacar, na linha de estudo de metodologias para o corte de carga, o projeto de Pesquisa e Desenvolvimento denominado “Sistema Inteligente de Apoio à Decisão de Corte de Carga – SICC”, resultado de uma parceria entre a empresa CELESC – Centrais Elétricas de Santa Catarina SA e o Laboratório de Planejamento de

Sistemas de Energia da UFSC (LabPlan/UFSC). Desse projeto, no qual tive a oportunidade de iniciar os estudos que desencadearam nessa dissertação de mestrado, resultaram dois artigos, (Andrade, Knolseisen, Gaulke *et al.*, 2006) e (Camargo, Coelho, Gaulke *et al.*, 2005), que mostram uma metodologia para o corte de carga em sistemas de distribuição, buscando a otimização da qualidade do atendimento aos consumidores.

2.3 Variação da Demanda Elétrica em Função da Tensão

Sabe-se que o consumo de energia das cargas conectadas nos sistemas de potência pode sofrer variações em função de alterações das grandezas elétricas ocorridas na fonte de alimentação. Classicamente, alguns estudos apresentados na literatura procuram analisar os efeitos percebidos na demanda elétrica de um sistema quando das alterações na magnitude e frequência do sinal de tensão.

A possibilidade de conservação de energia com a redução dos níveis de tensão nas barras, é uma prática já estabelecida em algumas empresas distribuidoras e que motivou muitos estudos nessa área, entre eles o apresentado por Steese, Merrick e Kennedy (1990).

Esses programas de conservação de energia são uma importante estratégia para reduzir a demanda dos sistemas de distribuição. Por meio do controle dos reguladores de tensão ou ajustes na relação de transformação (TAP) dos transformadores das subestações, pode-se reduzir o consumo, mantendo os limites toleráveis de qualidade do serviço no que tange ao perfil de tensão do sistema (Chen, Wu, Lee *et al.*, 1995).

Para planejar essas ações que envolvem o controle de tensão visando reduzir a demanda, faz-se necessário o uso de programas de fluxo de potência que adotem uma modelagem de carga diferente da convencional, na qual normalmente consideram-se as cargas como sendo de potência constante.

Na força tarefa do IEEE para representação da carga para análise de performance dinâmica (IEEE, 1993), são apresentados alguns conceitos básicos para modelagem de carga que são úteis nos estudos de comportamento da carga com a variação de tensão. Dentre eles destacam-se:

- **Modelo de Carga:** Um modelo de carga é uma representação matemática da relação entre a tensão da barra (magnitude e frequência) e a potência (ativa e reativa) ou corrente fluindo na barra;
- **Modelo Estático de Carga:** Modelo que expressa as potências ativas e reativas a qualquer instante de tempo como função da magnitude da tensão e da frequência naquele instante. Esses modelos de carga são usados tanto para componentes de carga essencialmente estáticos (carga resistiva e iluminação) assim como uma aproximação para componentes de cargas dinâmicas (motores controlados);
- **Modelo Dinâmico de Carga:** Modelo que expressa as potências ativas e reativas a qualquer instante de tempo como função da magnitude de tensão e da frequência de instantes passados de tempo e, usualmente, incluindo o instante atual;
- **Modelo de Carga de Impedância Constante:** Modelo estático de carga onde a potência varia diretamente com o quadrado da magnitude de tensão;
- **Modelo de Carga de Corrente Constante:** Modelo estático de carga onde a potência varia diretamente com a magnitude da tensão;
- **Modelo de Carga de Potência Constante:** Modelo estático de carga onde a potência não varia com mudanças na magnitude da tensão. Ele também pode ser chamado de modelo de carga MVA constante. Como os dispositivos MVA constantes, tais como motores e dispositivos eletrônicos, não mantêm essa característica abaixo de certa tensão (tipicamente 80 a 90%), muitos modelos de carga fornecem a mudança de MVA constante (e outros modelos estáticos) para impedância constante, ou desconectam a carga abaixo de uma tensão especificada;
- **Modelo de Carga Polinomial:** Modelo estático de carga que representa a relação da potência com a magnitude de tensão como uma equação polinomial, usualmente da seguinte forma:

$$\begin{aligned}
 P &= P_0 \left[a_p + b_p \left(\frac{V}{V_0} \right) + c_p \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 \right], \text{ sendo que : } a_p + b_p + c_p = 1 \\
 Q &= Q_0 \left[a_q + b_q \left(\frac{V}{V_0} \right) + c_q \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 \right], \text{ sendo que : } a_q + b_q + c_q = 1
 \end{aligned}
 \tag{2.6}$$

Os parâmetros desse modelo são os coeficientes (a, b, c) e o fator de potência da carga. Esse modelo é algumas vezes referido como o modelo "ZIP", uma vez que consiste da soma dos termos de impedância constante (Z), corrente constante (I), e potência constante (P). É importante salientar que V_0 é a tensão de referência (nominal), e P_0 e Q_0 devem ser respectivamente as potências ativa e reativa consumidas nessa tensão de referência;

- **Modelo de Carga Exponencial:** Modelo estático de carga que representa a relação entre potência e tensão como uma equação exponencial, usualmente da seguinte forma:

$$\begin{aligned}
 P &= P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{np} \\
 Q &= Q_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{nq}
 \end{aligned}
 \tag{2.7}$$

Dois ou mais termos com diferentes expoentes são algumas vezes incluídos em cada equação. Os parâmetros desse modelo são os expoentes, np e nq , e o fator de potência da carga. Nota-se que ajustando esses expoentes para 0, 1, ou 2, a carga pode ser representada pelos modelos potência constante, corrente constante, ou impedância constante, respectivamente. Outros expoentes podem ser usados para representar o efeito de agregação de diferentes tipos de componentes de carga. Expoentes maiores do que 2 (dois) ou menores do que 0 (zero) podem ser apropriados para alguns tipos de cargas.

As cargas usualmente encontradas em sistemas de potência podem ser categorizadas em: industrial, residencial e comercial. Essa classificação pode se dividir em níveis menores. Por exemplo, cargas residenciais podem ser subdivididas em: aquecimento, iluminação e dispositivos eletrônicos. Outras subdivisões também são

possíveis, evidenciando a complexidade da composição das cargas em qualquer barra do sistema. Dessa forma, em modelos de carga mais condizentes com as características reais do sistema elétrico, as cargas não devem ser representadas apenas como impedância, corrente ou potência constantes. É desejável maior exatidão na representação das variações de demanda, para melhorar a confiabilidade e eficiência nas operações de controle dos sistemas de potência (Dias e El-Hawary, 1989).

Alinhadas com essa preocupação, muitas técnicas e aproximações tem sido pesquisadas nas últimas décadas. Alguns algoritmos utilizam como dados de entrada a capacidade dos transformadores de distribuição ou informações das faturas de energia dos consumidores combinadas com fatores de coincidência para estimar os modelos de carga do sistema (Ghosh, Lubkeman e Jones, 1997).

Esses algoritmos também podem ser divididos em algumas categorias, de acordo com o método que utilizam (regressão, séries temporais, espaço de estados, inteligência artificial e métodos híbridos).

Por exemplo, Wang, H. e Schulz (2001) apresentam um método para modelagem de carga em tempo real que busca estimar o carregamento nos transformadores de distribuição de baixa tensão. O algoritmo proposto utiliza as informações de medidores de consumo automatizados, instalados em cada unidade consumidora, juntamente com o uso de curvas de carga por classe de consumidor.

Já Ranade, Ellis e Mechenbier (2001) examinam o uso da técnica de regressão por mínimos quadrados no desenvolvimento de modelos de carga estáticos polinomiais, a partir de testes de variação de tensão. Esse tipo de aproximação, baseada em medidas reais no sistema, envolve a instalação de monitores (registradores de massa) em várias subestações para determinar a sensibilidade da carga ativa e reativa, frente às variações de magnitude e frequência da tensão. Essa modelagem tem a vantagem da monitoração direta da carga real, podendo estimar os parâmetros dos modelos de carga diretamente na forma necessária à aplicação de fluxos de potência, por exemplo. Sua desvantagem é devida aos custos de aquisição e instalação dos equipamentos registradores e à necessidade de monitorar todas as cargas do sistema, ou extrapolar o modelo a partir de medidas limitadas.

As medidas precisam também ser repetidas com as mudanças de carga, devido a fatores sazonais e demais causas de variações no comportamento do carregamento.

Outra técnica para modelagem da carga apresentada em Price, Wirgau, Murdoch *et al.* (1988), é a aproximação baseada nos componentes, que envolve a construção de modelos de carga a partir de informações das partes constituintes da demanda, requerendo, dentre outras informações, os três conjuntos de dados citados abaixo:

- Dados do “mix” de carga, que descrevem o percentual de contribuição de cada classe consumidora (ex.: residencial, industrial, comercial, etc.) no total de potência ativa e reativa de cada barra;
- Dados da composição da carga, que descrevem o percentual de cada um dos componentes de carga (ex.: aquecimento, resfriamento de ar, iluminação, motores, etc.) no total de potência ativa e reativa para cada classe consumidora;
- Dados da característica dos componentes de carga, que descrevem as características elétricas (ex.: fator de potência, sensibilidade de tensão e frequência) de cada um dos componentes de carga.

2.4 Ferramentas para Otimização do Corte de Carga

Conforme já salientado, a execução do corte de carga em sistemas de distribuição deve procurar atender diversos critérios simultaneamente, possibilitando a maximização de ganhos tanto para a empresa concessionária quanto para os clientes. Dessa forma, torna-se necessária a utilização de técnicas de otimização que proporcionem o cumprimento de tal tarefa da melhor maneira possível.

Com o intuito de averiguar as diferentes abordagens de otimização, apresenta-se na seqüência uma breve discussão sobre as características dos métodos encontrados na literatura.

2.4.1 Métodos Matemáticos

O conceito de otimização está diretamente relacionado à realização de qualquer tarefa da maneira mais eficiente possível, podendo a eficiência ser avaliada de inúmeras maneiras, de acordo com o tipo da tarefa a ser executada.

Os primeiros métodos desenvolvidos no campo da otimização procuravam modelar os problemas por meio de equações matemáticas, sendo chamados de Programação Matemática. Dessa forma, a maioria dos livros clássicos que tratam do tema otimização, aborda esse paradigma de solução, como por exemplo, as referências Bazaraa e Shetty (1979) e Luenberger (1984).

As técnicas de otimização na linha da programação matemática abordam o problema de forma determinística e iterativa, por meio de gradientes, funcionais, operações matriciais, etc. Dessa forma, normalmente necessitam de grande quantidade de informações e determinadas condições, como por exemplo: região viável bem definida, suavidade da função objetivo e convexidade do problema (Castro, 2001).

Particularmente no problema de otimização do corte de carga, esse tipo de abordagem torna-se demasiadamente complexa, dada à dificuldade de se obterem modelos matemáticos para representar todas as variáveis do processo decisório.

2.4.2 Métodos Baseados em Inteligência Artificial

As técnicas de inteligência artificial (IA) objetivam desenvolver algoritmos computacionais para realizar tarefas cognitivas, nas quais os humanos são atualmente melhores (Sage, 1990). Assim, tipicamente um sistema baseado em inteligência artificial deve ser capaz de armazenar o conhecimento, aplicá-lo para resolver os problemas e adquirir novo conhecimento através da experiência (Haykin, 2001).

Nas situações práticas em que o conhecimento disponível é incompleto ou inexato, as técnicas de inteligência artificial podem lidar com incertezas, utilizando procedimentos de raciocínio probabilístico (Russell e Novig, 1995).

Dentre as técnicas de otimização que utilizam inteligência artificial, podem-se destacar os algoritmos genéticos.

2.4.2.1 Algoritmos Genéticos

Os algoritmos evolucionários, dentre os quais os algoritmos genéticos são os mais populares, são técnicas de otimização baseadas nos mecanismos da evolução e da genética.

Os Algoritmos Genéticos (AG) são inspirados na teoria da evolução das espécies, proposta por Charles Darwin, cujos fundamentos teóricos foram desenvolvidos por J.H. Holland em 1975 (Holland, 1975).

De forma generalizada, os algoritmos genéticos trabalham com uma população de indivíduos representados por cromossomos, que durante o processo evolutivo reproduzem-se de modo que a adequação média dos indivíduos da população melhore a cada nova geração (Goldberg, 1989).

Há também outros métodos baseados em IA, como as redes neurais artificiais, os sistemas especialistas e a lógica fuzzy, que, apesar de não focarem a otimização de funções objetivo, são bastante utilizados na busca de soluções para problemas de complexo modelamento matemático.

2.4.2.2 Redes Neurais Artificiais

A origem das Redes Neurais Artificiais (RNA's) remete o interesse dos pesquisadores em desenvolver técnicas para imitar algumas características do comportamento cerebral, tais como: robustez, tolerância a falhas, flexibilidade e processamento paralelo das informações (Paulo, 2004).

As RNA's são compostas por modelos matemáticos (neurônios) que interagem em paralelo de acordo com uma topologia definida (rede). Após passarem pelo processo de treinamento e aprendizado estão aptas a apontarem soluções para o problema em que foram treinadas.

2.4.2.3 Sistemas Especialistas

Os sistemas especialistas atuam em um domínio específico, procurando reproduzir a solução que seria diagnosticada por um especialista humano. A base de conhecimento do sistema consiste de um conjunto de regras, que ativado por fatos relacionados ao problema desencadeiam uma seqüência lógica coordenada por um mecanismo de inferência.

2.4.2.4 Lógica Fuzzy

A lógica fuzzy, também chamada de lógica difusa, proposta por L. A. Zadeh em 1965 (Zadeh, 1965), surgiu para tratar de problemas onde existe uma região cujas classificações se tornam imprecisas.

Na lógica difusa, as proposições são representadas com graus de associação entre os possíveis estados das variáveis. Por exemplo, um automóvel pode ser 0,7 caro e 0,3 barato. Isso concede à lógica difusa características que permitem um melhor tratamento de problemas onde as fronteiras não são bem definidas.

2.4.3 Aplicação de Ferramentas de IA no Corte de Carga

Alguns trabalhos apresentados na literatura relatam o uso de algumas dessas ferramentas de inteligência artificial para indicar as operações de corte de carga.

Luan, Irving e Daniel (2002) apresentam a aplicação de um algoritmo genético para encontrar a estratégia ótima de restauração do fornecimento de energia em sistemas de distribuição. O algoritmo também aponta a solução para a realização do corte de carga, quando não se consegue restaurar toda demanda. A função objetivo procura, respeitando cargas prioritárias, minimizar critérios como: custo de operação com chaveamento, perdas elétricas e atendimento da maior demanda possível.

Também utilizando algoritmo genético, Lopes, Wa e Proença (1999) apresentam uma metodologia para o planejamento de ações de corte de carga em situações de sub-frequência no sistema de geração. A estratégia consiste na desconexão de alimentadores, objetivando a minimização do corte total de carga sujeito às características dinâmicas do sistema.

Em Shah e Shahidehpour (1989) é proposto um sistema especialista para reconhecimento do impacto de contingências no sistema elétrico e desenvolvimento de estratégias para restauração e corte de carga, em interação com o operador do sistema de potência.

Já Croce, Fazzini, Massucco *et al.* (2001) apresentam o desenvolvimento de um sistema especialista para aplicação de corte de carga em plantas industriais, com forte presença de turbinas a gás e vapor.

Também podem ser encontradas aplicações de redes neurais nessa área de estudo. Como exemplo, tem-se em Wong e Lau (1992) e Hsu, Kang e Chen (2005) o uso de RNA's para determinação de corte de carga no suporte à estabilidade de sistemas multi-máquinas.

2.4.4 Otimização Multicritério

Muitos problemas reais de tomada de decisão envolvem a otimização simultânea de diferentes objetivos, como é o caso do corte de carga em sistemas de distribuição proposto nesse trabalho.

Em princípio, a otimização multicritério é bem diferente da otimização de um único objetivo, ou otimização monocritério. A otimização monocritério procura obter a melhor solução dentre todas as opções no espaço de busca do problema. Já no caso da otimização multicritério, pode não existir uma solução ótima única com respeito a todos os objetivos.

Tipicamente, um problema de otimização multicritério pode ter um conjunto de soluções que são melhores que todas as outras soluções no espaço de busca do problema, quando todos os objetivos são considerados, mas que podem ser inferiores a outras soluções no espaço de busca de apenas alguns dos objetivos. Essas soluções ótimas, quando considerado o espaço de busca de todos os objetivos, são chamadas de soluções Pareto-ótimas ou soluções não-dominadas. O restante das soluções são chamadas de soluções dominadas (Chankong e Haimes, 1983).

2.4.4.1 Formulação de um Problema Multicritério

De maneira geral, um problema de otimização multicritério consiste em um número N de funções-objetivo ($\bar{F}_i(\bar{x})$) e é associado com uma quantidade J de restrições de desigualdade ($\bar{G}_j(\bar{x})$) e número K de restrições de igualdade ($\bar{G}_j(\bar{x})$), conforme definido a seguir.

$$\begin{aligned}
 \text{Minimizar/Maximizar} \quad & \bar{F}_i(\bar{x}) & i=1,2,\dots,N \\
 \text{Sujeito a:} & & \\
 & \bar{G}_j(\bar{x}) \leq 0 & j=1,2,\dots,J \\
 & \bar{H}_k(\bar{x}) = 0 & k=1,2,\dots,K
 \end{aligned} \tag{2.8}$$

A solução desse problema multicritério consiste no conjunto de soluções composto por todos os vetores de decisão que não podem melhorar o valor de qualquer objetivo sem degradar, pelo menos, algum dos outros critérios. Esses vetores são chamados de ótimos de Pareto (Castro, 2001).

Matematicamente, as soluções ótimas de Pareto para um problema de minimização puro podem ser descritas pelas seguintes definições (Castro, 2001):

Definição 1: Dominância

Um ponto $\mathbf{A}=(a_1,a_2,\dots,a_m)$ domina outro ponto $\mathbf{B}=(b_1,b_2,\dots,b_m)$ se $\forall i \in \{1,2,\dots,n\} : f_i(\mathbf{A}) \leq f_i(\mathbf{B})$ e $\exists j \in \{1,2,\dots,n\} : f_j(\mathbf{A}) < f_j(\mathbf{B})$.

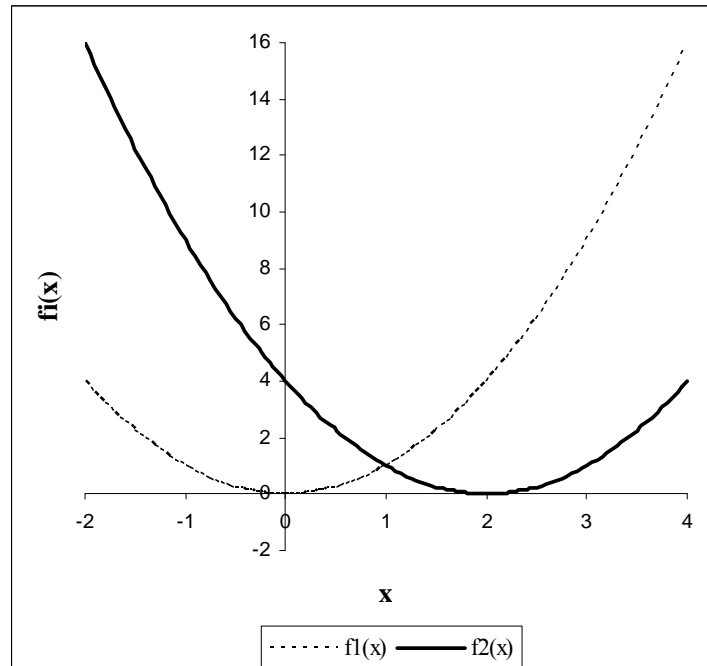
Definição 2: Solução não-dominada ou Pareto-ótima

Um ponto \mathbf{A} é uma solução não-dominada e pertence à fronteira de Pareto se não existe nenhum outro ponto \mathbf{B} , tal que \mathbf{B} domine \mathbf{A} . Em geral, para cada região viável existe um subconjunto S de soluções não-dominadas, chamadas de ótimos de Pareto.

É importante lembrar que um conjunto de soluções não-dominadas é definido no contexto de uma amostra do espaço de busca, enquanto que o conjunto ótimo de Pareto é definido em relação a todo espaço de busca do problema.

Um problema simples pode ser utilizado para ilustrar o conceito de otimização multicritério de Pareto. Este problema foi usado com o mesmo propósito por Vincent e Grantham (1981) e posteriormente por Schaffer (1984). O problema é composto por duas funções-objetivo, conforme descrito abaixo e apresentado na Figura 2.1.

$$\begin{aligned}
 \text{Minimizar} \quad & f_1(x) = x^2 \\
 & f_2(x) = (x-2)^2
 \end{aligned} \tag{2.9}$$

Figura 2.1 – Representação gráfica das funções-objeto f_1 e f_2

Pela figura acima, pode-se ver que o conjunto de soluções Pareto-ótimas é composto por todos os valores de x variando de 0 a 2, uma vez que fora dessa região tanto a função f_1 como a f_2 são crescentes.

Outra forma de visualizar a fronteira de Pareto (conjunto das soluções Pareto-ótimas) consiste no emprego de um gráfico paramétrico no espaço das funções objetivo, como pode ser observado na Figura 2.2.

É interessante ressaltar que nenhuma das soluções no conjunto das não dominadas é melhor do que qualquer outra em todos os critérios, portanto qualquer uma das soluções nesse conjunto é aceitável. A escolha de uma solução perante as demais é um problema que envolve inúmeros fatores, estando essa decisão fortemente relacionada com o agente responsável pela tomada de decisão. Dessa forma é bastante interessante para o processo de otimização multicritério que todas as soluções ótimas de Pareto sejam conhecidas, possibilitando que a tomada de decisão seja feita considerando-se todas as soluções não-dominadas.

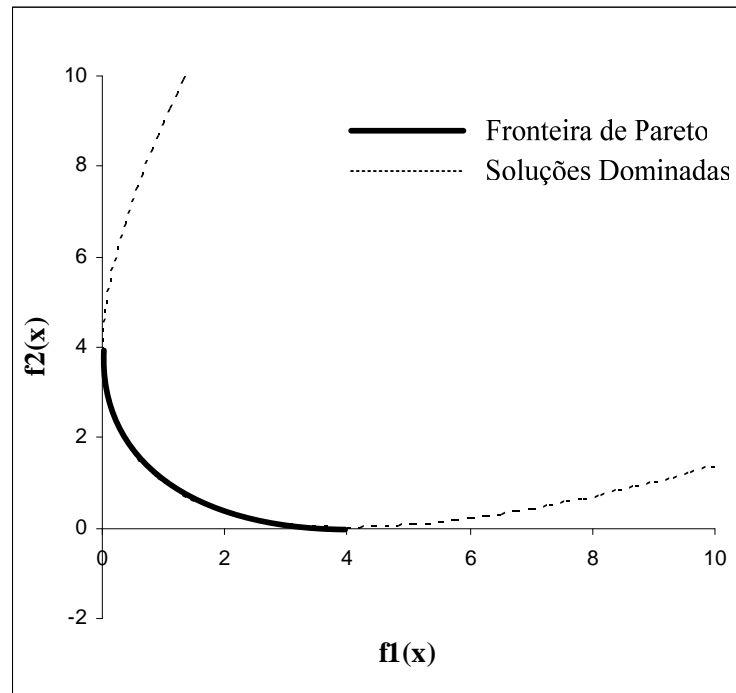


Figura 2.2 – Identificação da Fronteira de Pareto

Na tentativa de encontrar a fronteira ótima de Pareto, inúmeros métodos têm sido estudados. Pretende-se aqui apenas tecer um comentário sobre aqueles que são considerados de maior relevância nessa área de estudo.

Particularmente, devido as suas habilidades para trabalhar com uma população de soluções e não apenas com soluções individuais, a maioria dos métodos que tiveram êxito na busca pelas soluções Pareto-ótimas envolvem a aplicação de algoritmos genéticos.

Este é o caso do algoritmo chamado *Vector Evaluated Genetic Algorithms*, conhecido por VEGA, apresentado por Schaffer em 1984 (Schaffer, 1984), considerado pioneiro na solução de problemas multicritérios por meio da aplicação de algoritmos evolucionários. Schaffer modificou a lógica de um algoritmo genético básico por meio da implementação de uma rotina para seleção cíclica de acordo com cada objetivo. Esse procedimento de seleção é repetido para cada objetivo, até se obter um número pré-determinado de indivíduos para reprodução.

Outro algoritmo nessa linha de estudo foi apresentado por Hajela e Lin (1992). A metodologia proposta utiliza o método da soma dos produtos entre os objetivos e seus respectivos pesos para determinação das aptidões de cada indivíduo. Uma das

características do algoritmo está no fato de os pesos não serem fixos, mas sim codificados no genótipo dos indivíduos.

Embasados nas fundamentações apresentadas por Goldberg (1989), Fonseca e Fleming (1993) desenvolveram o algoritmo para otimização multicritério conhecido por MOGA (*Multi-objective Optimization Genetic Algorithm*), que utiliza um procedimento de ordenamento não-dominado no qual toda população é analisada e os indivíduos não-dominados são classificados como sendo de ordem 1. O restante da população também é ordenada, sendo o indicador de posição de cada indivíduo igual ao número de indivíduos que o dominam acrescido de uma unidade. Esse ordenamento é utilizado no procedimento de seleção para reprodução.

Na mesma época, Horn e Nafpliotis (1993), implementaram um algoritmo genético denominado nPGA (*Niched Pareto Genetic Algorithm*). Esse método faz uso de um procedimento de ordenamento na etapa de seleção, que consiste em comparar dois indivíduos retirados da população, com um conjunto de comparação compreendido de um número específico de indivíduos tomados randomicamente da população, no início de cada processo de seleção. Se um desses indivíduos é dominado e o outro é não-dominado, então esse último é selecionado. Caso ambos sejam não-dominados ou dominados, um contador de nicho é criado para cada indivíduo na população inteira. O contador é baseado no número de soluções com uma certa distância do indivíduo. Ao final, a solução que apresentar o menor contador de nicho é selecionada.

Também seguindo as idéias apresentadas por Goldberg (1989), Srinivas e Deb (1994) desenvolveram o NSGA (*Nondominated Sorting Genetic Algorithm*), que utiliza um procedimento de seleção por ordenamento juntamente com uma rotina para criação de nichos objetivando manter a diversidade populacional.

Um outro algoritmo foi apresentado por Zitzler e Thiele (1998), conhecido por SPEA (*Strength Pareto Evolutionary Algorithm*). No SPEA, a cada geração as soluções não-dominadas são mantidas numa população isolada, caracterizando-se como um filtro dos indivíduos de primeira ordem. Essa população é utilizada normalmente nos cruzamentos entre os indivíduos.

Em 2001, Castro apresentou um algoritmo para otimização multicritério usando AG, nomeado pelo autor como PMOGA (*Pareto Multiobjective Genetic Algorithm*) (Castro, 2001). Esse algoritmo baseia-se em alguns conceitos apresentados nos trabalhos anteriormente citados nessa mesma linha de estudo. As idéias desse trabalho serão utilizadas como fundamentação para composição de uma das ferramentas de otimização multicritério para determinação do corte de carga apresentadas nesse trabalho. A implementação dessa ferramenta baseada no PMOGA será apresentada e discutida mais a frente, no capítulo que trata da metodologia proposta.



CAPÍTULO

3

METODOLOGIA PROPOSTA

***E**ste capítulo apresenta a metodologia desenvolvida para otimização multicritério das ações de corte de carga em sistemas de distribuição de energia elétrica. São expostas as considerações sobre os módulos de redução da necessidade de corte via regulação de tensão e otimização das ações de desligamento de alimentadores. A metodologia de avaliação multicritério também é detalhada.*

3.1 Apresentação da Metodologia de Corte de Carga

No contexto apresentado no capítulo 1, é possível observar que as técnicas empregadas na execução do corte de carga têm influência direta nos índices de qualidade e custos que a interrupção no fornecimento reflete aos consumidores e concessionária, devendo essa operação ser efetuada de forma a causar o menor impacto possível.

Nesse sentido, este capítulo apresenta o desenvolvimento de uma metodologia para otimização da execução do corte de carga visando a melhoria da qualidade no fornecimento de energia elétrica com o uso em conjunto de técnicas de inteligência artificial, múltiplos critérios e regulação dos perfis de tensão.

O objetivo é obter um procedimento para corte de carga, que irá determinar, de maneira otimizada, quais alimentadores devem ser desligados para conseguir a redução de demanda solicitada pela operação para a região delimitada. A Figura 3.1 apresenta o fluxograma da metodologia proposta para o corte de carga inteligente.

Após a aquisição dos dados de todos alimentadores¹² abrangidos pela região sob execução do corte de carga, pode ser feita a solicitação da quantidade de demanda ativa que precisa ser reduzida no sistema (solicitação de corte de carga).

A metodologia para indicação do corte otimizado é composta, basicamente, por dois módulos independentes: regulação de tensão e desligamento de alimentadores. De forma simplificada, pode-se definir o primeiro módulo como o responsável pela verificação da redução do carregamento dos alimentadores por meio da regulação de tensão nas subestações de distribuição. Com isso, consegue-se estimar a quantidade de demanda que não mais precisará ser desconectada para atender o corte solicitado, auxiliando assim na redução da necessidade de desligamentos.

Já o segundo módulo executa a otimização propriamente dita das ações de corte de carga, indicando o conjunto de alimentadores que deve ser desligado para completar o corte solicitado. Esse módulo utiliza ferramentas de inteligência artificial e para fins de

¹² Esses dados serão melhor apresentados no capítulo 4, mas basicamente resumem-se aos valores de demanda elétrica por ponto de carga, especificação do condutor por trecho, posição geográfica das cargas e informações referentes aos indicadores de continuidade dos alimentadores e conjuntos de consumidores.

estudo serão desenvolvidas duas metodologias independentes para execução dessa tarefa, uma delas utilizando algoritmo genético convencional e outra que faz uso de algoritmo genético para otimização multicritério.

Assim, com a composição desses dois módulos em uma ferramenta computacional, tem-se como saída a indicação do procedimento otimizado para que o operador do sistema elétrico execute o corte de carga solicitado.

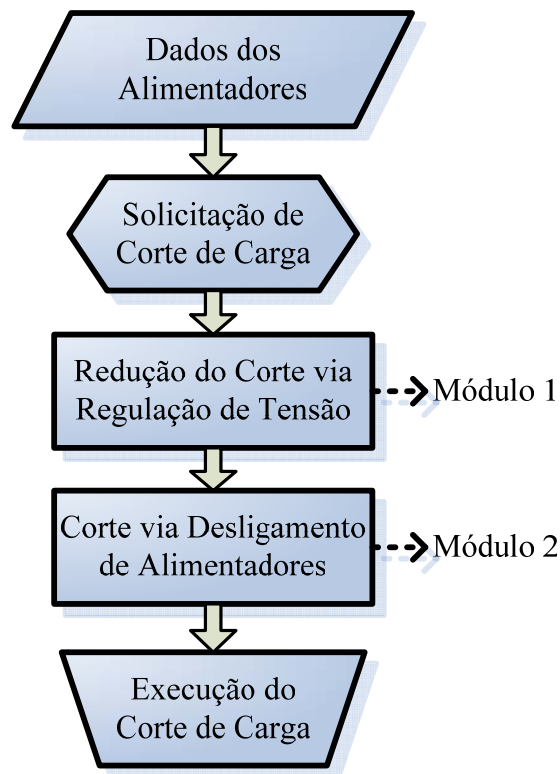


Figura 3.1 – Fluxograma da metodologia para corte de carga

Na seqüência serão apresentados os módulos citados, enfatizando as atribuições de cada um deles.

3.2 Módulo 1: Controle de Tensão nas Subestações

Esse primeiro módulo da metodologia proposta procura obter a tensão ótima de despacho¹³ na saída dos alimentadores das subestações, que se encontram na área de solicitação do corte de carga, para minimizar a necessidade de desligamentos. A partir do conhecimento das condições de carregamento dos alimentadores, o algoritmo verifica a potência ativa que pode ser aliviada da rede através da regulação de tensão na saída das subestações, respeitando os limites para o adequado fornecimento de energia ao longo dos alimentadores.

Conforme já citado no capítulo 2, sabe-se que o consumo de energia das cargas conectadas nos sistemas de potência pode sofrer variações em função de alterações das grandezas elétricas “tensão” e “frequência” na fonte de alimentação. Portanto, para planejar ações que envolvam o controle de tensão visando reduzir a demanda de energia elétrica, faz-se necessário o uso de ferramentas de fluxo de potência que adotem uma modelagem de carga diferente da convencional, na qual normalmente são consideradas as cargas como sendo do tipo potência constante.

Assim, para averiguar os efeitos da regulação de tensão na redução do carregamento, objetivando a redução da necessidade de corte de carga, foi utilizado o modelo de carga polinomial, apresentado na referência (IEEE, 1993).

Esse é um modelo estático de carga que representa a relação da potência com a magnitude de tensão como uma equação polinomial, conforme o equacionamento abaixo.

$$\begin{aligned}
 P &= P_0 \left[a_p + b_p \left(\frac{V}{V_0} \right) + c_p \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 \right], \text{ sendo que } : a_p + b_p + c_p = 1 \\
 Q &= Q_0 \left[a_q + b_q \left(\frac{V}{V_0} \right) + c_q \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 \right], \text{ sendo que } : a_q + b_q + c_q = 1
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

Esse modelo é referido como o modelo "ZIP", uma vez que consiste da soma dos termos de impedância constante (Z), corrente constante (I), e potência constante (P). É

¹³ Melhor tensão de saída do alimentador que pode ser executada para minimização da necessidade de desligamentos, levando em consideração as possibilidades de chaveamento do TAP do transformador.

importante salientar que “ V_0 ” é a tensão de referência (nominal), “ V ” é a tensão no ponto de carga e “ P_0 ” e “ Q_0 ” devem ser respectivamente as potências ativa e reativa consumidas nessa tensão de referência. Os parâmetros “ a ”, “ b ” e “ c ” correspondem respectivamente aos percentuais de cargas do tipo potência, corrente e impedância constante conectadas no alimentador ou ponto de estudo.

3.2.1 Algoritmo para Redução da Necessidade de Corte de Carga

Utilizando o modelo de carga mencionado, desenvolveu-se um algoritmo para calcular o montante de demanda ativa que pode ser reduzido, por meio da redução do TAP das subestações na abrangência do corte de carga.

Uma preocupação importante desse módulo é o atendimento aos critérios de conformidade de tensão, conforme disposto na Resolução ANEEL N°. 676/2003 (Aneel, Res. N°. 676/2003) e sumarizados na Tabela 2.1.

O fluxograma desse algoritmo pode ser visualizado na Figura 3.2. Basicamente o processo consiste na redução gradativa do TAP das subestações, verificando se com essa operação não há qualquer infração nos níveis de tensão ao longo dos alimentadores. Para verificar a redução da demanda elétrica, a qual implica numa menor necessidade de corte de carga, executa-se o fluxo de carga antes e após as alterações de TAP efetuadas pelo algoritmo, contemplando todos os alimentadores na abrangência do corte. Como saída, o algoritmo fornece o montante de demanda ativa que pode ser reduzida com a regulação de tensão e os TAPs sugeridos par cada subestação.

Algumas nomenclaturas utilizadas no algoritmo dizem respeito à hierarquia da concentração de dados utilizada para determinar uma certa área do sistema de distribuição. Nesse caso, o COD (Centro de Operação da Distribuição) concentra uma determinada quantidade de SEs (Subestações de Distribuição), que por sua vez congregam um número de ALs (Alimentadores de Distribuição). É importante destacar que está sendo considerado que todos os alimentadores de uma mesma subestação são alimentados pela mesma barra de saída dos transformadores, compartilhando desta forma a mesma tensão de despacho.

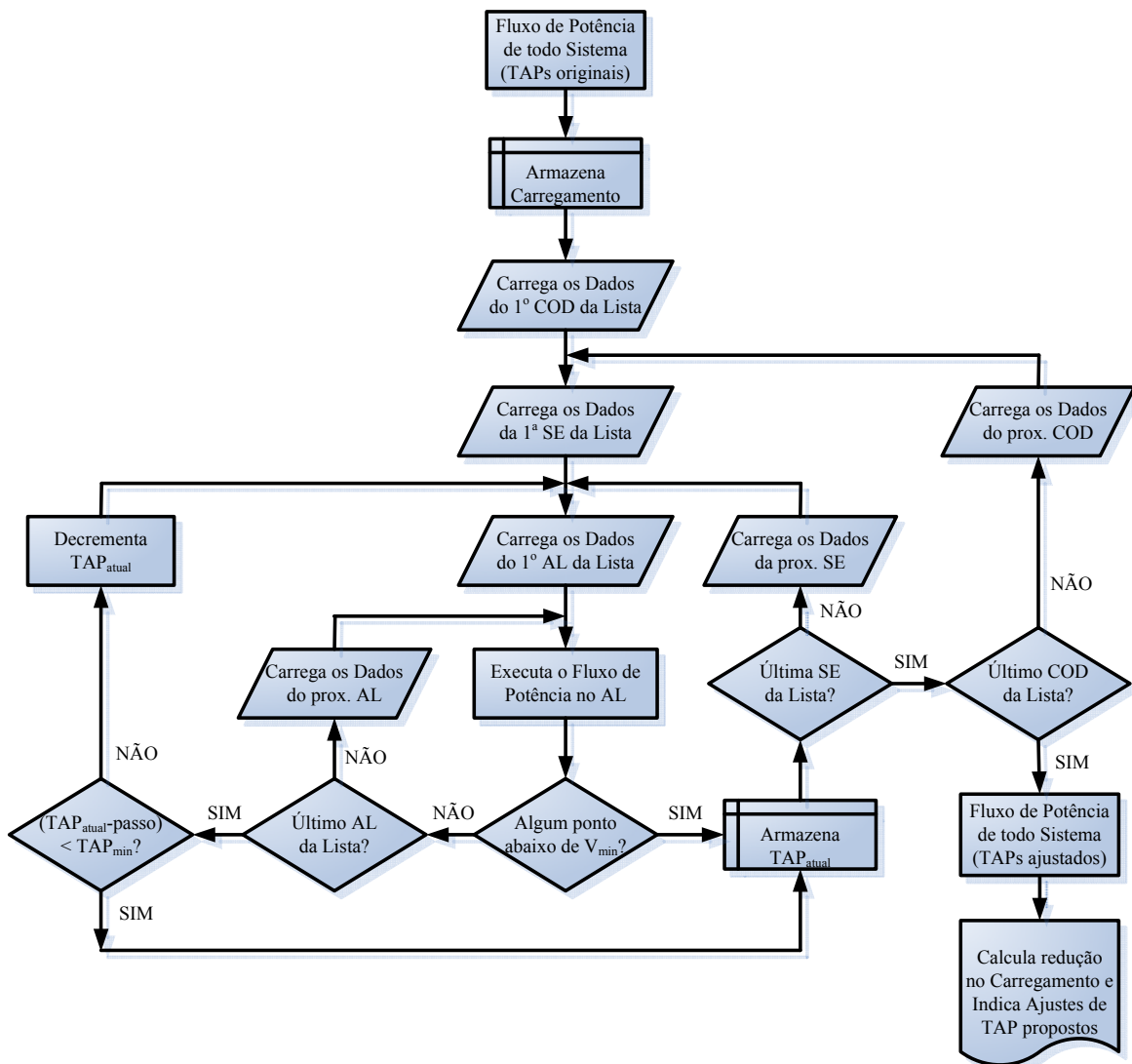


Figura 3.2 – Fluxograma do algoritmo para redução da necessidade de corte de carga

3.2.1.1 Fluxo de Potência

A tarefa central do algoritmo apresentado acima consiste na execução de Fluxos de Potência, considerando a modelagem das cargas de acordo com o modelo “ZIP” – equação (3.1). Porém sabe-se que características inerentes aos sistemas de distribuição, como estrutura lateral complexa com troncos radiais e parâmetros de rede com alta relação entre R e X, fazem com que métodos convencionais para cálculo de fluxo de potência tenham dificuldade de convergência.

O método “Soma das Potências”, conforme proposto por Baran e Wu (1989), faz uso dessas particularidades das redes de distribuição, não apresentando nenhuma restrição

quanto à estrutura lateral e nem dependência dos parâmetros da rede (R e X). Além disso, possui relativa facilidade de implementação computacional e modelagem de equipamentos de sistemas de distribuição, motivo pelo qual foi utilizado neste trabalho.

- Método Soma das Potências

Esse processo iterativo para o fluxo de potência realiza o cálculo das potências nodais no sentido carga-fonte e o cálculo das tensões nodais no sentido fonte-carga.

A solução do fluxo de carga para sistemas de distribuição baseado no Método Soma das Potências pode ser resumida nos seguintes passos:

1. Ler os dados do sistema;
2. Definir tolerância para convergência das tensões, vetor inicial de tensões igual à tensão de despacho da SE e contador de iterações igual a zero;
3. Enquanto o valor obtido pelo critério de convergência for maior que a tolerância fixada:
 4. Corrigir as potências ativas e reativas de cada barra em função da tensão da barra;
 5. Calcular as potências ativa e reativa acumuladas nas barras e as perdas ativa e reativa nos ramos da rede (sentido das barras terminais à fonte);
 6. Calcular as tensões nodais (da fonte em direção às barras terminais);
 7. Incrementar contador de iterações;
8. Se o critério de convergência não for maior que a tolerância fixada, atualizar vetor das tensões e voltar ao passo 3;
9. Caso contrário, abandonar o laço de iterações, calcular as informações necessárias e imprimir os resultados requeridos.

Basicamente, a modificação realizada no método original da Soma das Potências consiste no passo 4, responsável por corrigir os valores de carga, modeladas segundo (3.1), de acordo com as tensões nodais.

3.2.2 Simulador

Com o intuito de analisar os efeitos da consideração de um modelo de carga sensível à tensão, bem como avaliar a metodologia proposta no algoritmo descrito anteriormente, foi desenvolvido um simulador computacional.

Essas simulações serão realizadas para o sistema teste apresentado a seguir.

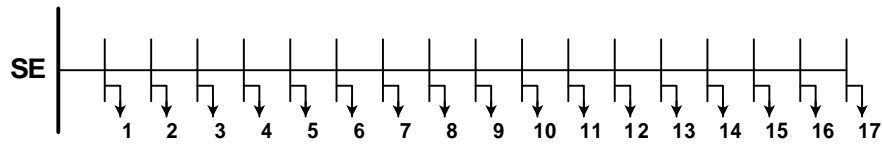


Figura 3.3 - Sistema 17 barras

Esse sistema é operado na tensão nominal de 13,8 kV na barra da SE, com os seguintes dados de rede (Sharaf e Ibrahim, 1996):

Tabela 3.1 – Dados do sistema 17 barras

Ramo Nr.	Barra		Resistência (Ohms/km)	Reatância (Ohms/km)	Comp. (km)	Dados da Barra "Para"	
	De	Para				Pot. Ativa (kW)	Pot. Reativa (kVAr)
1	0	1	0,0922	0,0470	1,00	90,00	40,00
2	1	2	0,4930	0,2511	1,00	100,00	60,00
3	2	3	0,3660	0,1864	1,00	90,00	40,00
4	3	4	0,3811	0,1941	1,00	120,00	80,00
5	4	5	0,8190	0,7070	1,00	60,00	30,00
6	5	6	0,1872	0,6188	1,00	60,00	20,00
7	6	7	0,7114	0,2351	1,00	200,00	100,00
8	7	8	1,0300	0,7400	1,00	200,00	100,00
9	8	9	1,0440	0,7400	1,00	60,00	20,00
10	9	10	0,1966	0,0650	1,00	60,00	20,00
11	10	11	0,3744	0,1238	1,00	45,00	30,00
12	11	12	1,4680	1,1550	1,00	60,00	35,00
13	12	13	0,5416	0,7129	1,00	60,00	35,00
14	13	14	0,5910	0,5260	1,00	120,00	80,00
15	14	15	0,7463	0,5450	1,00	60,00	10,00
16	15	16	1,2890	1,7210	1,00	60,00	20,00
17	16	17	0,7320	0,5740	1,00	60,00	20,00

Como o objetivo da etapa em questão é observar o impacto da modelagem das cargas no alívio de corte conseguido com a regulação de tensão, o simulador mostra as variações no consumo de potência ativa e reativa em função dos possíveis níveis de ajuste do TAP e modelagem da carga.

Assim, para uma dada configuração de carga, a simulação inicia com TAP unitário e gradualmente o algoritmo decrementa esse parâmetro da subestação em passos de 1%, até que qualquer barra do sistema viole o limite mínimo de tensão. Cabe lembrar que esse limite mínimo estabelecido para a tensão nominal de 13,8 kV é de 0,93 p.u., conforme resolução ANEEL 676/2003 (Aneel, Res. Nº. 676/2003).

Três composições de carga foram analisadas: 100% potência constante, 100% impedância constante e 100% corrente constante. Para cada uma dessas configurações, adota-se o procedimento de redução de TAP descrito acima, sendo que em cada valor do TAP é calculada a variação no consumo ativo e reativo em relação ao consumo de potência observado sob TAP unitário para a mesma composição de carga atual, conforme o equacionamento abaixo.

$$\begin{aligned} \Delta P &= P_{TAP_unitário} - P_{TAP_ajustado} \\ \Delta Q &= Q_{TAP_unitário} - Q_{TAP_ajustado} \end{aligned} \quad (3.2)$$

Onde:

ΔP e ΔQ : Redução do consumo de potência ativa e reativa do sistema;

$P_{TAP_unitário}$ e $Q_{TAP_unitário}$: Consumo de potência ativa e reativa com o TAP unitário;

$P_{TAP_ajustado}$ e $Q_{TAP_ajustado}$: Consumo de potência ativa e reativa com o TAP ajustado pelo algoritmo.

3.2.2.1 Cargas 100% Potência Constante

Para esse caso a variação no consumo de potência ativa e reativa com a redução do TAP da SE é verificada considerando a carga como 100% potência constante. Com isso, os parâmetros da equação (3.1) serão: a_p e $a_q = 1$; b_p e $b_q = 0$; c_p e $c_q = 0$.

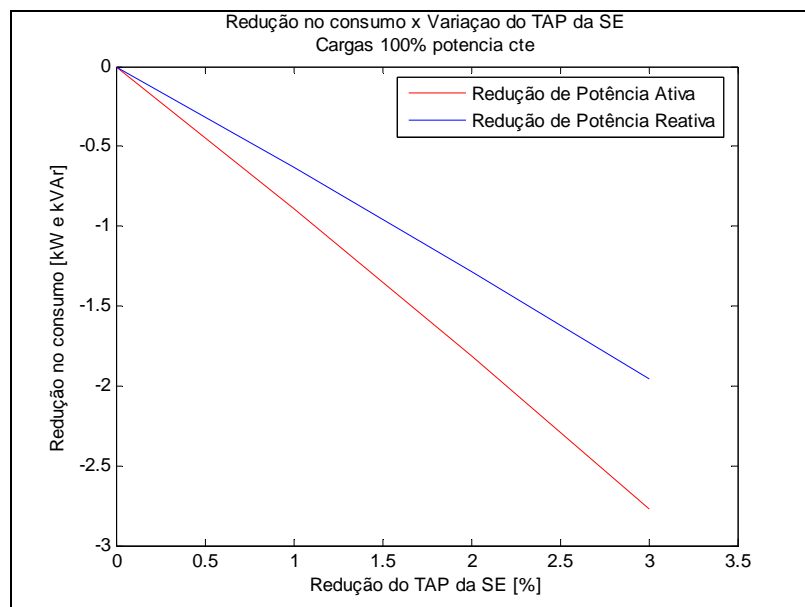


Figura 3.4 - Redução no consumo (cargas 100% potência constante)

Pelo gráfico é possível observar que modelando a carga como 100% potência constante, com a redução do TAP da SE (ou seja, diminuição no nível de tensão do alimentador) ocorre uma “redução” negativa no consumo de potências, ou seja, um aumento no consumo.

Isso pode ser justificado ao se olhar diretamente para a equação $S=V.I^*$. Como nesse caso mantém-se constante a potência (S), com a diminuição da tensão (V) a corrente (I) é incrementada para manter a relação. Com o aumento da corrente, têm-se maiores perdas ativas e reativas, justificando o aumento no consumo verificado no gráfico.

3.2.2.2 Cargas 100% Corrente Constante

Cargas modeladas apenas como uma parcela proporcional à tensão, 100% corrente constante (a_p e $a_q = 0$; b_p e $b_q = 1$; c_p e $c_q=0$).

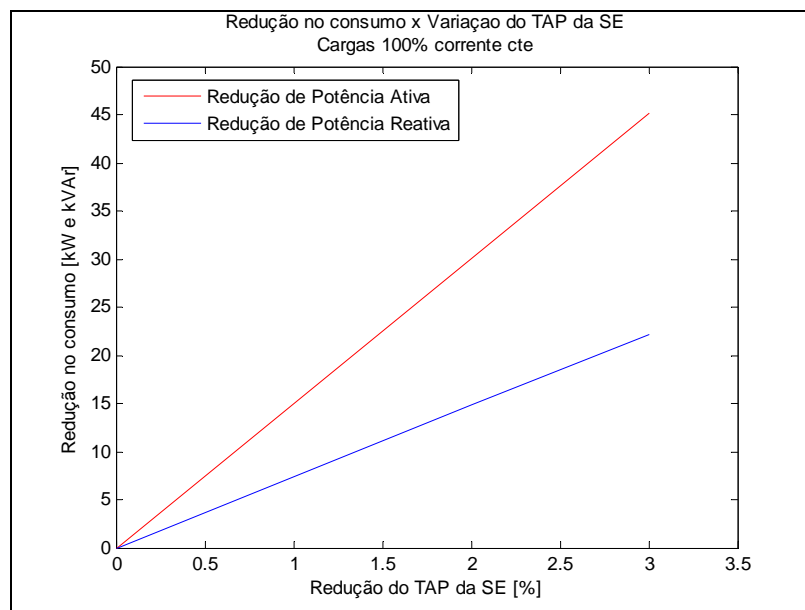


Figura 3.5 - Redução no consumo (cargas 100% corrente constante)

3.2.2.3 Cargas 100% Impedância Constante

Para esse caso, considera-se a carga como 100% impedância constante, ou seja: a_p e $a_q = 0$; b_p e $b_q = 0$; c_p e $c_q=1$.

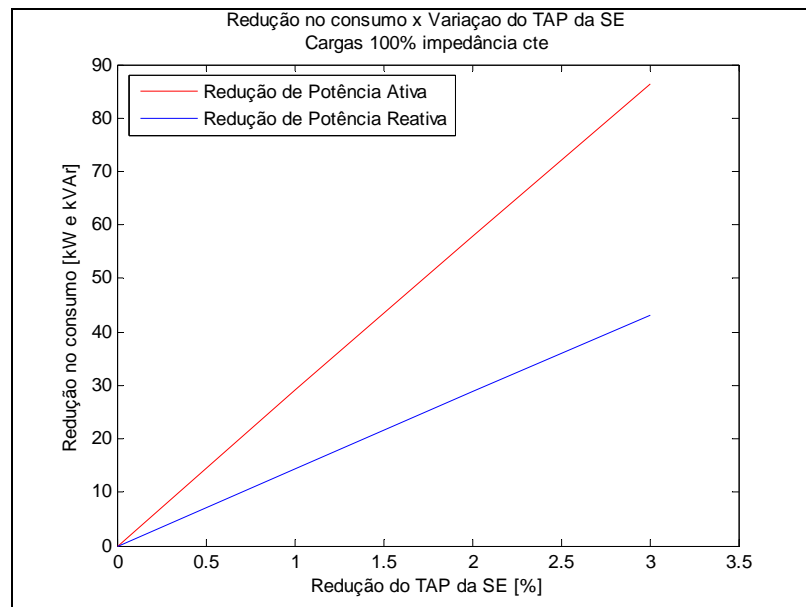


Figura 3.6 - Redução no consumo (cargas 100% impedância constante)

Pode-se observar pelas figuras anteriores, que nos três casos simulados, o valor mínimo conseguido para o TAP da SE sem violar o limite de tensão no alimentador foi de 0,97 p.u. (redução de 3% mostrada no eixo das abscissas).

Com respeito à redução no consumo, pode-se comprovar a diminuição nos carregamentos conforme são inseridas cargas dependentes da tensão (cargas modeladas como corrente ou impedância constante). Assim, quanto maior a proporção dessas cargas no sistema, menor o corte necessário no módulo 2.

Porém, na prática não existe uma maneira simples de se determinar os valores das constantes “a”, “b” e “c” relacionadas às parcelas de carga do modelo ZIP. Algumas aproximações foram discutidas no capítulo de referências bibliográficas, entretanto para fins de estudo, neste trabalho serão arbitrados valores para a composição das cargas de maneira a tornar possível a realização de avaliações referentes aos ganhos proporcionados pela aplicação da metodologia sugerida.

3.3 Módulo 2: Corte de Carga via Desligamento de Alimentadores

Após a tentativa de reduzir a necessidade de corte utilizando-se o controle de tensão nas subestações, o segundo módulo da metodologia proposta é responsável pela indicação do conjunto de alimentadores que deve ser desconectado da rede de distribuição para completar a redução na demanda solicitada. Visando ganhos tanto para os consumidores quanto para a concessionária, essa tarefa deve ser realizada de forma otimizada.

Entretanto, a sua realização é mais complexa do que o Módulo 1, uma vez que envolve a otimização de diversos critérios simultaneamente. Além disso, por se tratar do estado de operação de alimentadores (conectado ou desconectado), o problema é de difícil equacionamento matemático para o emprego de métodos de otimização clássica, que tratam o problema de forma determinística.

Dessa forma, a técnica de inteligência artificial denominada Algoritmo Genético (AG) torna-se uma alternativa bastante atrativa para solução dessa classe de problemas. Ela é considerada muito versátil e robusta para otimização de problemas de difícil modelagem matemática, por não empregar o cálculo de derivadas, mas sim atuar diretamente na busca das soluções no espaço viável, trabalhando com regras de transição probabilísticas. O AG é portanto, classificado como método direto ou de ordem zero, no qual a busca por soluções pode se dar simultaneamente com variáveis reais, lógicas e inteiras, sobre conjuntos não-convexos e mesmo disjuntos, com funções objetivo também não-convexas e não diferenciáveis.

Segundo Goldberg (1989), os AG são métodos numéricos de otimização que apresentam aspectos peculiares em relação aos demais, garantindo sua robustez: trabalha com codificação de parâmetros ao invés de parâmetros originais do problema; pesquisa soluções ótimas a partir de um conjunto de soluções e não a partir de uma; emprega uma função de avaliação para as diferentes soluções encontradas e utiliza regras probabilísticas e não determinísticas na pesquisa de novas soluções. Assim, os AG são simples, flexíveis, robustos e particularmente úteis na solução de problemas em que outras técnicas de otimização apresentam dificuldades para encontrar a solução. Porém, cabe ressaltar que os algoritmos genéticos não têm garantia de otimalidade da solução encontrada.

Dessa forma, para resolver o problema de otimização do corte de carga, duas metodologias independentes utilizando AG foram desenvolvidas. O objetivo de se ter as duas abordagens é facilitar o processo de validação das soluções encontradas e com isso conferir maior confiabilidade para as metodologias de otimização propostas.

Essas duas abordagens serão expostas na seqüência do trabalho, mas cabe adiantar algumas características básicas de cada uma delas. A primeira metodologia proposta utiliza como base um algoritmo genético básico (SGA), diferenciando-se pelo emprego de um processo de avaliação multicritério para proceder o cálculo das aptidões de cada indivíduo. Com a evolução das gerações, encontra-se ao final do processo **uma solução** ótima que indica quais alimentadores devem ser desconectados para se obter o menor prejuízo a todos os critérios.

O segundo método é composto por um algoritmo genético que incorpora os princípios da otimização multicritério na sua lógica de funcionamento. Esse algoritmo avalia os critérios conjuntamente, gerando ao final do processo um determinado número de soluções não-dominadas. Com a aplicação da mesma avaliação multicritério utilizada para o SGA, encontra-se um **conjunto de soluções** (distintas alternativas) de corte de carga, classificadas de acordo a pontuação recebida nessa avaliação. Entretanto, todas são soluções da fronteira de Pareto, ou seja, não-dominadas. Assim, fica disponível como saída do processo, um conjunto de soluções para execução do corte de carga, cabendo a decisão sobre qual operação será realizada ao próprio operador do sistema, diferentemente do primeiro caso, onde apenas uma solução é gerada pelo algoritmo.

3.3.1 Formulação Multicritério

Para que seja possível a formulação do problema com múltiplos critérios e consequentemente exista uma maneira de avaliar as soluções perante tais objetivos, deve-se inicialmente definir quais atributos serão considerados no processo de otimização.

A correta escolha e utilização desses critérios de avaliação constituem a etapa mais importante do processo que será responsável pelo corte de carga. A solução deste problema implica naturalmente na dinâmica de outros problemas, tão ou mais complexos para a atividade de distribuição de energia elétrica.

O cumprimento das metas de continuidade, a energia não suprida, a correta priorização das cargas atendidas, entre outros, são compromissos diretamente impactados pelas decisões assumidas durante o processo de contingência de carga. Partindo desta constatação, a solução para o corte de carga inteligente deve ser aquela que melhor responda aos problemas adjacentes ao corte.

Sendo assim, os seguintes critérios foram eleitos para o desenvolvimento da metodologia de apoio à decisão:

- DEC - Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora;
- FEC - Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora;
- DIC - Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora;
- FIC - Frequência de Interrupção Individual por Unidade Consumidora;
- Prioridade das Cargas;
- ENS - Energia Não Suprida.

O intuito de se considerar os indicadores globais (DEC e FEC) e individuais (DIC e FIC) de continuidade está ligado à preocupação da concessionária quanto ao cumprimento das metas estabelecidas para cada um deles e cobradas pelo órgão regulador (ANEEL), bem como mostra o interesse da distribuidora em não comprometer o fornecimento de energia dos mesmos consumidores repetitivamente. Com a inserção desses objetivos na formulação multicritério, tem-se uma melhoria nos indicadores de qualidade da empresa mesmo mediante condições de contingenciamento de carga, o que poderá ser um fator de impacto positivo perante os seus clientes.

A prioridade das cargas, por sua vez, procura atender para a necessidade de se dar atenção diferenciada a consumidores que necessitam de maior continuidade no fornecimento de energia, exigindo uma qualidade diferenciada. Isto pode ocorrer por diversas razões, como as apresentadas por Oliveira (2004): carga elevada, indústria importante, contrato especial de fornecimento de energia, área de centro de cidade, região de importância estratégica por possuir sede de governo ou sede política da região, área de exército, hospitais e empresas com problemas de continuidade no processo em caso de interrupção de energia, tais como fábricas de celulose, moenda de grãos, etc. A metodologia em questão

permite a escolha da maior prioridade de carga que será aceita como alternativa viável para o corte de carga.

O critério da energia não suprida contempla o desejo da concessionária em minimizar a sua perda de receita devida ao corte de carga. Assim, esse atributo está diretamente ligado à exatidão do corte, ou seja, proceder o desligamento de alimentadores para contemplar a solicitação de corte da maneira mais exata possível. Para atender esse objetivo, o processo de otimização será responsável por encontrar a combinação de alimentadores que, quando desligados, atendam da maneira mais eficiente possível a demanda do corte. Para que haja maior flexibilidade na tomada de decisão quanto a esse critério de extrema importância, a metodologia proposta permite que seja definida uma tolerância dentro da qual são aceitas alternativas de corte que resultem em valores inferiores à solicitação de corte de carga. Isso é justificável dada às diversas imprecisões que o modelo de carga pode incorporar, não impondo à empresa uma maior despesa com o desligamento dos consumidores.

Para atender às solicitações dos diversos critérios apresentados, a formulação multicritério pode ser entendida da seguinte forma:

Max (FolgaDEC ; FolgaFEC ; FolgaDIC ; FolgaFIC)

Min PrioridadeCorte

Min DeltaCorte

Sujeito a:

DeltaCorte \geq Tolerância

PrioridadeCorte \leq PrioridadeAdmitida

As folgas relacionadas aos indicadores de continuidade são medidas comparando-se as metas estabelecidas para cada indicador e os valores acumulados para os mesmos no período em questão.

O critério “PrioridadeCorte” diz respeito à prioridade associada à carga mais importante que será desconectada com a adoção do corte proposto, a qual deve ser inferior à máxima prioridade de carga permitida para desligamento (“PrioridadeAdmitida”).

Já o critério “DeltaCorte” quantifica a diferença entre as demandas do corte solicitado e aquele que está sendo proposto pela solução encontrada, estando relacionado

portanto à ENS. Esse valor deve ser maior ou igual à tolerância permitida para cortes inferiores ao solicitado.

A maneira como os procedimentos de avaliação são considerados para cada critério será apresentada na seqüência.

3.3.2 Metodologia de Avaliação Multicritério

As duas metodologias aplicando ferramentas de inteligência artificial para otimizar as ações de corte de carga, utilizam um processo de avaliação dos critérios mostrados anteriormente, em diferentes etapas do processo. Para tanto, pretende-se mostrar na seqüência de que forma esses critérios são pontuados e a maneira como é efetuado o cálculo da pontuação multicritério associada a cada alternativa de corte de carga. É importante destacar que o desenvolvimento dessa metodologia, principalmente a etapa de pontuação das alternativas, foi embasada nos conceitos apresentados por Ensslin, Montibeller-Neto e Noronha (2001) e Belton e Stewart (2002).

Inicialmente é importante apresentar a maneira como o problema foi modelado para aplicação de algoritmos genéticos. Assim, alguns conceitos básicos são importantes, tais como “Cromossomo” e “Gene”. O “cromossomo” representa um ponto de busca no espaço de soluções, sendo denominado de indivíduo, e é composto por uma *string* de comprimento finito, onde cada *bit* representa um “gene”, que possui local fixo nesse cromossomo.

No problema do corte de carga, a modelagem proposta nesse trabalho consiste na utilização de um cromossomo de comprimento igual à quantidade de alimentadores disponíveis para o corte, onde cada gene desse cromossomo representa um alimentador específico. Para carregar as informações necessárias ao processo multicritério, cada um desses genes faz referência a um registro em banco de dados, contendo as informações referentes ao alimentador em questão, como: Nomes do COD, SE e AL, folgas nos indicadores de continuidade (DEC, FEC, DIC, FIC), prioridade das cargas conectadas e valores referentes à demanda.

Para indicar o estado de operação de cada alimentador (gene) do cromossomo, utilizam-se os *bits* “1” e “0”. Assim, quando o gene referente a determinado alimentador

possuir o *bit* “1”, significa que a alternativa apresentada indica que esse alimentador deverá permanecer **conectado**. Quando o gene for o *bit* “0”, o referido alimentador deverá ser **desconectado**, ou seja, cortado.

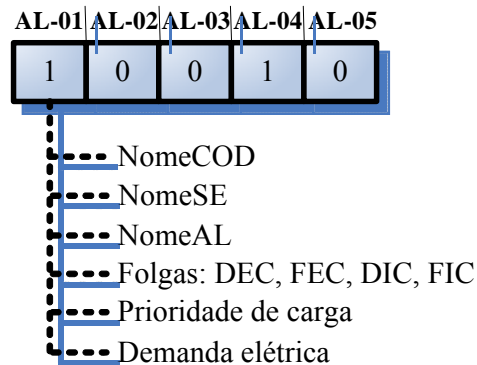


Figura 3.7 – Codificação do cromossomo para aplicação no AG

Como exemplo, apresenta-se na Figura 3.7 uma situação hipotética para um sistema com cinco alimentadores (AL-01, AL-02, AL-03, AL-04 e AL-05), onde a alternativa de corte de carga sugere a desconexão dos alimentadores AL-02, AL-03 e AL-05. Para ilustrar a representação de cada carga genética, a figura indica também as informações contidas no registro de cada gene.

3.3.2.1 Cálculo dos Valores Absolutos dos Critérios Considerados

Para possibilitar o cômputo de uma pontuação considerando todos os critérios simultaneamente, para cada alternativa de corte de carga, é preciso inicialmente estabelecer os procedimentos para valorar cada um dos critérios individualmente, em valores absolutos referentes à sua grandeza.

- Cálculo do valor da “FolgaDEC”

A utilização do índice DEC na função multicritério ressalta a preocupação com o cumprimento das metas desse indicador segundo acordado com a ANEEL, em resolução específica para cada concessionária. Assim, as operações de corte de carga terão seu impacto minimizado no tocante à degeneração desse indicador de continuidade.

O intuito é calcular a “FolgaDEC” associada a cada alimentador, porém sabe-se que as metas são definidas para cada conjunto sob concessão da distribuidora. Assim, como um mesmo alimentador pode fornecer energia a mais de um conjunto, no intuito de se determinar a contribuição que o desligamento desse alimentador acarreta no DEC de um

conjunto, deve-se em primeira instância saber que percentual aquele alimentador representa no total de consumidores do conjunto.

No presente trabalho, a participação de cada alimentador nos diferentes conjuntos está armazenada em um registro na base de dados, permitindo dessa maneira o cálculo do impacto no DEC que cada alimentador representa nos conjuntos em que se faz presente.

Como esse indicador está relacionado com a duração das interrupções, para calcular o efeito negativo sobre o DEC de cada conjunto, faz-se necessária uma estimativa da duração prevista para o corte de carga que está sendo solicitado pela operação.

Com a estimativa desse valor de tempo para o corte (Δt), em horas, e a contribuição percentual de cada alimentador nos conjuntos ($\alpha_{a,c}$), pode-se calcular a folga restante no indicador DEC de cada conjunto, para cada alimentador interrompido, segundo:

$$FolgaDEC_{c,a} [\%] = \frac{\left(\frac{Meta_c^{DEC}}{12} \times Mês - Acum_c^{DEC} - \alpha_{a,c} \cdot \Delta t \right)}{\frac{Meta_c^{DEC}}{12} \times Mês} \times 100 \quad (3.3)$$

Onde,

$FolgaDEC_{c,a} [\%]$: Folga do DEC do conjunto c após o corte do alimentador a ;

$Meta_c^{DEC}$: Meta anual do indicador DEC do conjunto c ;

$Acum_c^{DEC}$: Valor acumulado do DEC do conjunto c ;

$\alpha_{a,c}$: Contribuição percentual do alimentador a no conjunto c ;

Δt : Duração prevista para o corte de carga, em horas;

$Mês$: Mês corrente no instante de corte (1 a 12).

Cabe destacar que o termo $\alpha_{a,c} \cdot \Delta t$ representa o acréscimo no indicador DEC do conjunto c devido ao desligamento do alimentador a , uma vez que o cálculo desse indicador, conforme (2.1), é composto por uma parcela que depende do número de consumidores atingidos em relação ao total de consumidores do conjunto, o qual é o parâmetro $\alpha_{a,c}$ do equacionamento acima.

Essa formulação permite atribuir a cada alimentador os valores referentes à folga no indicador DEC de cada conjunto por ele percorrido, devido ao seu desligamento em qualquer época do ano. Assim, para efeitos da avaliação multicritério no AG, cada alimentador, designado por um gene no cromossomo, terá o parâmetro “FolgaDEC” descrito pelo menor valor de folga calculado para todos os conjuntos que o referido alimentador atravessa. Com isso, leva-se em consideração a pior situação acarretada por cada alimentador nesse indicador de continuidade.

- Cálculo do valor da “FolgaFEC”

O segundo critério a ser considerado na classificação dos alimentadores sujeitos ao desligamento, refere-se à Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (FEC). A utilização desse critério para valorar uma alternativa de corte retrata a preocupação com o cumprimento das metas de FEC para cada conjunto, segundo o acordado com a ANEEL.

Da mesma maneira que para o DEC, esse indicador é definido para cada conjunto de consumidores, havendo assim a necessidade de se conhecer a contribuição percentual no número de consumidores de cada alimentador nos conjuntos, registrada no arquivo do banco de dados. De maneira análoga à equação (3.3), o cálculo da folga do FEC atribuído a cada alimentador de acordo com os conjuntos por ele percorridos é dado por:

$$FolgaFEC_{c,a} [\%] = \frac{\left(\frac{Meta_c^{FEC}}{12} \times Mês - Acum_c^{FEC} - \alpha_{a,c} \right)}{\frac{Meta_c^{FEC}}{12} \times Mês} \times 100 \quad (3.4)$$

Onde,

$FolgaFEC_{c,a} [\%]$: Folga do FEC do conjunto c após o corte do alimentador a ;

$Meta_c^{FEC}$: Meta anual do indicador FEC do conjunto c ;

$Acum_c^{FEC}$: Valor acumulado do FEC do conjunto c ;

$\alpha_{a,c}$: Contribuição percentual do alimentador a no conjunto c ;

$Mês$: Mês corrente no instante de corte (1 a 12).

Como o índice FEC não leva em conta a duração das interrupções, o acréscimo nesse indicador para os conjuntos, devido ao desligamento de cada alimentador, depende apenas do percentual de consumidores do conjunto conectados no alimentador passível de corte, dado pelo termo $\alpha_{a,c}$.

Assim como para o DEC, esse cálculo atribui a cada alimentador os valores referentes à folga no indicador FEC de cada conjunto por ele percorrido, devido ao seu desligamento em qualquer época do ano.

Para efeitos da avaliação multicritério no AG, o termo “FolgaFEC” de cada alimentador será considerado como o menor valor de folga calculado para todos os conjuntos que o referido alimentador atravessa.

- Cálculo do valor da “FolgaDIC” e “FolgaFIC”

A utilização dos critérios individuais de continuidade (DIC e FIC) na composição da avaliação multicritério reflete a preocupação com a qualidade da energia entregue a cada consumidor individualmente.

Assim como no caso dos indicadores globais de qualidade, o DIC e o FIC possuem metas acordadas com o órgão regulador. Segundo texto da resolução ANEEL 177/2005 (Aneel, Res. Nº. 177/2005), a partir de janeiro de 2004, os padrões de DIC e FIC devem obedecer aos valores estabelecidos de acordo com as metas anuais de DEC e FEC definidas em resolução específica.

Entretanto, a partir da entrada em vigor dessa resolução 177/2005 (28/11/2005), em substituição a resolução ANEEL 024/2000, esses critérios individuais considerados na otimização do corte de carga têm o caráter exclusivo de preocupação com o consumidor na primazia do atendimento com excelência de qualidade. Isso porque, ainda de acordo com a Resolução ANEEL 177/2005, na apuração dos indicadores DIC e FIC, não deverão ser consideradas as interrupções oriundas de atuação de esquemas de alívio de carga e aquelas vinculadas ao racionamento instituído pelo Poder Concedente.

Dessa forma, para considerar essa preocupação com os consumidores individualmente, serão calculados os valores de folga no DIC e FIC de cada alimentador, apurando-se as diferenças entre os valores acumulados e a metas estabelecidas.

Como esses indicadores são analisados para cada unidade consumidora, foi necessária a criação de um novo registro no banco de dados dos alimentadores, contendo a indicação do consumidor com maior valor de DIC e FIC acumulado, bem como as metas estabelecidas para a mesma unidade consumidora. Esses valores estão referenciados em base mensal, trimestral e anual, sendo que para a apuração da folga há uma filtragem inicial que seleciona a situação mais deficitária, ou seja, aquele período (mensal, trimestral ou anual) que já possui a folga mais comprometida.

Após essa pré-seleção, o cálculo da “FolgaDIC” e “FolgaFIC” de cada alimentador, devido ao seu desligamento, é dado por:

$$FolgaDIC_a [\%] = \frac{(Meta^{DIC} - Acum^{DIC} - \Delta t)}{Meta^{DIC}} \times 100 \quad (3.5)$$

$$FolgaFIC_a [\%] = \frac{(Meta^{FIC} - Acum^{FIC} - 1)}{Meta^{FIC}} \times 100 \quad (3.6)$$

Onde,

$FolgaDIC_a [\%]$: Folga do DIC para o pior período e unidade consumidora observados, após o corte do alimentador a ;

$FolgaFIC_a [\%]$ Folga do FIC para o pior período e unidade consumidora observados, após o corte do alimentador a ;

$Meta^{DIC}$: Meta mensal, trimestral ou anual do indicador DIC, de acordo com a seleção da pior folga pré-corte;

$Meta^{FIC}$ Meta mensal, trimestral ou anual do indicador FIC, de acordo com a seleção da pior folga pré-corte;

$Acum^{DIC}$: Valor acumulado mensal, trimestral ou anual do indicador DIC, de acordo com a seleção da pior folga pré-corte;

$Acum^{FIC}$ Valor acumulado mensal, trimestral ou anual do indicador FIC, de acordo com a seleção da pior folga pré-corte;

Δt : Duração prevista para o corte de carga, em horas.

Diferentemente do caso do DEC e FEC, para os indicadores individuais não há necessidade de avaliar um percentual de contribuição de cada alimentador nos conjuntos, sendo que o tempo de corte e o desligamento do alimentador, impactam diretamente nas folgas do DIC e FIC de cada unidade consumidora.

- Cálculo do valor da “PrioridadeCorte”

Para levar em conta a prioridade das cargas, esse critério presente na avaliação multicritério deverá apontar a carga mais crítica conectada em cada alimentador. Esta consideração visa preservar a importância relativa dos consumidores atendidos, independentemente das quantidades de energia demandadas.

Para possibilitar essa avaliação de importância, utiliza-se uma classificação das cargas, inicialmente distribuídas em 3 (três) grupos para as diferentes modalidades:

- **Grupo A** – Cargas Passíveis de Corte (baixa prioridade): Esse grupo congrega as cargas menos críticas quanto à interrupção no fornecimento de energia elétrica, como, por exemplo, consumidores rurais, residenciais, edifícios e condomínios comerciais, supermercados, hotéis, estabelecimentos de ensino, iluminação pública, áreas de lazer, dentre outras;
- **Grupo B** – Cargas de Corte Não Recomendável (média prioridade): Agrupamento das cargas que começam a apresentar consequências mais sérias quando sofrem desligamentos forçados de energia. Como exemplos enquadram-se nesse grupo as indústrias, centro de processamento de dados, estabelecimentos bancários, shopping centers, delegacias, poderes públicos, frigoríficos e demais cargas do entendimento da concessionária.
- **Grupo C** – Cargas de Risco Pessoal e Segurança Pública (alta prioridade): Esse grupo reúne as cargas com maior importância quanto ao atendimento contínuo de energia. Exemplos: aeroportos, terminais rodoviários e ferrovias, bombeiros, presídios, bombeamento de água, comunicações e telecomunicações, áreas de grande concentração pública, mecanismos de sobrevivência artificial, hospitais, órgãos de segurança pública, centros de operação do sistema elétrico e outras cargas de mesma natureza.

Consideram-se, ainda, 5 (cinco) subníveis de prioridade dentro de cada grupo, sendo o índice 5 (cinco) dado às cargas mais importantes do grupo e o índice 1 (um) às menos importantes sob o enfoque acima apresentado. Essa classificação deve ser realizada pela equipe de planejamento da concessionária de energia, de acordo com o conhecimento dos tipos de consumidores existentes nos alimentadores.

Conforme já explanado anteriormente, a metodologia de otimização multicritério proposta, permite que seja definida a prioridade máxima aceita para ser praticada numa ação de corte de carga, considerada como restrição do problema.

- Cálculo do valor do “DeltaCorte”

Este critério representa a diferença entre o corte de carga solicitado pela operação do sistema de distribuição e o corte de carga sugerido pela alternativa representada pelo indivíduo (cromossomo) que está sendo avaliado.

Dessa forma, diferentemente do cálculo apresentado para os critérios anteriores, nesse caso a avaliação é feita para o cromossomo como um todo, não atribuindo valores para cada alimentador, ou seja, para cada gene.

O cálculo dessa função do modelo multicritério consiste no somatório das demandas ativas de todos os alimentadores selecionados para o corte de carga, ou seja, caracterizados pelo *bit* 0 (zero) no gene que representa determinado alimentador, conforme Figura 3.7.

Com isso, o critério “DeltaCorte” é dado segundo:

$$DeltaCorte [\%] = \frac{CorteProposto - CorteSolicitado}{CorteSolicitado} \times 100 \quad (3.7)$$

Onde,

DeltaCorte [%]: Diferença percentual entre o corte proposto e o solicitado;

CorteProposto: Somatório das demandas ativas dos alimentadores selecionados para o corte de carga na solução proposta;

CorteSolicitado: Demanda ativa solicitada para o corte de carga.

3.3.2.2 Cálculo dos Valores por Critério para cada Alternativa de Corte

No subitem anterior foram apresentadas as formas de avaliação dos critérios individualmente para cada alimentador, com exceção do critério “DeltaCorte” que exige a consideração do cromossomo como um todo.

Entretanto para realizar a avaliação multicritério de cada alternativa sugerida para o corte de carga, deve-se inicialmente determinar os valores individuais para cada critério considerando a solução como um todo, ou seja, verificando-se a indicação de corte apontada no cromossomo.

A metodologia proposta sugere a consideração do valor mais crítico de cada critério, dentre os alimentadores indicados para o corte de carga. Considera-se como mais crítico, aquele valor que compromete mais o desempenho de cada critério, ou seja, as menores folgas nos indicadores de continuidade e a maior prioridade de carga dos alimentadores preenchidos com o *bit* 0 (zero) no cromossomo.

Para exemplificar essa proposição, apresenta-se novamente a alternativa de corte que sugere o desligamento dos alimentadores AL-02, AL-03 e AL-05 de um sistema hipotético com cinco alimentadores disponíveis para o corte, conforme Figura 3.7.

Supondo uma solicitação de corte de 1500 kW e as demandas ativas de cada alimentador sob corte conforme descrito na Tabela 3.2, apresenta-se abaixo o resultado da avaliação por critério, para cada alimentador e para a alternativa de corte como um todo.

Tabela 3.2 – Valores de cada critério por alimentador e para a alternativa de corte sugerida

	AL-02	AL-03	AL-05	Avaliação da Alternativa
FolgaDEC	50 %	40%	35%	35 %
FolgaFEC	30%	35%	40%	30%
FolgaDIC	60%	45%	50%	45%
FolgaFIC	35%	40%	45%	35%
PrioridadeCorte	B5	B3	C2	C2
Demanda ativa	575 kW	550 kW	500 kW	(Total: 1625 kW)
DeltaCorte	---	---	---	$(1625-1500)/1500 = \mathbf{8,33 \%}$

3.3.2.3 Cálculo da Pontuação Multicritério para cada Alternativa de Corte

O passo seguinte da metodologia multicritério proposta, consiste na avaliação conjunta de todos os critérios para possibilitar a determinação de uma pontuação (uma nota) para cada alternativa de corte sugerida. Entretanto para que isso seja possível é necessário estipular uma maneira de valorar todos os critérios numa mesma base, de modo que os percentuais de cada folga, a prioridade do corte e a diferença entre o corte solicitado e proposto, representem valores da mesma ordem de grandeza para um mesmo grau de importância na função multicritério.

Uma maneira de realizar essa tarefa se dá por meio da abordagem de critério único de síntese, que se baseia no uso de funções de valor e/ou utilidade aplicada aos critérios estabelecidos (Ensslin, Montibeller-Neto e Noronha, 2001). O objetivo das funções de valor para cada critério é estabelecer um caminho matemático para que as variações de preferência na escala dos critérios sejam proporcionais aos diferentes sentimentos de valor que tais ações evidenciam aos decisores (especialistas da área) durante o processo de tomada de decisão.

Por fim, para compor um valor global para cada alternativa, é necessário agregar todos os critérios, agora já em uma mesma base de medida, de acordo com uma “função de agregação”. Essa função deve levar em conta as taxas de substituição, também chamadas de pesos, atribuídas a cada descritor dos diferentes pontos de vista fundamentais considerados. Esses conceitos mencionados nos últimos dois parágrafos serão abordados nos próximos subtópicos.

- Pontos de Vista e Descritores

Para auxiliar a quantificar o valor dado pelos decisores¹⁴ a cada um dos critérios em relação aos demais, pode-se fazer uso de uma estrutura arborescente que utiliza a lógica de decomposição, na qual um critério mais complexo de ser mensurado é decomposto em subcritérios de mais fácil mensuração. Os critérios inferiores devem ser mutuamente exclusivos e coletivamente necessitam fornecer uma caracterização completa do critério de nível hierárquico superior (Ensslin, Montibeller-Neto e Noronha, 2001).

¹⁴ Especialistas da área do conhecimento da qual trata o problema.

Assim são determinados os “Pontos de Vista Fundamentais” (PVF) e “Pontos de Vista Elementares” (PVE), que dizem respeito aos critérios de uma maneira mais ampla e os “Descritores”, que representam os atributos que podem ser mensurados matematicamente com relação a cada PVF e PVE.

- Taxas de Substituição

As taxas de substituição (w), também denominadas de pesos, indicam a importância concedida pelo decisor a cada um dos PVF e PVE da formulação multicritério. Seus valores são comparados relativamente dentro do mesmo nível hierárquico da estrutura arborecente.

Para a metodologia de corte de carga apresentada nesse trabalho, a estrutura arborecente mostrando os pontos de vista, descritores e taxas de substituição está mostrada na figura a seguir.

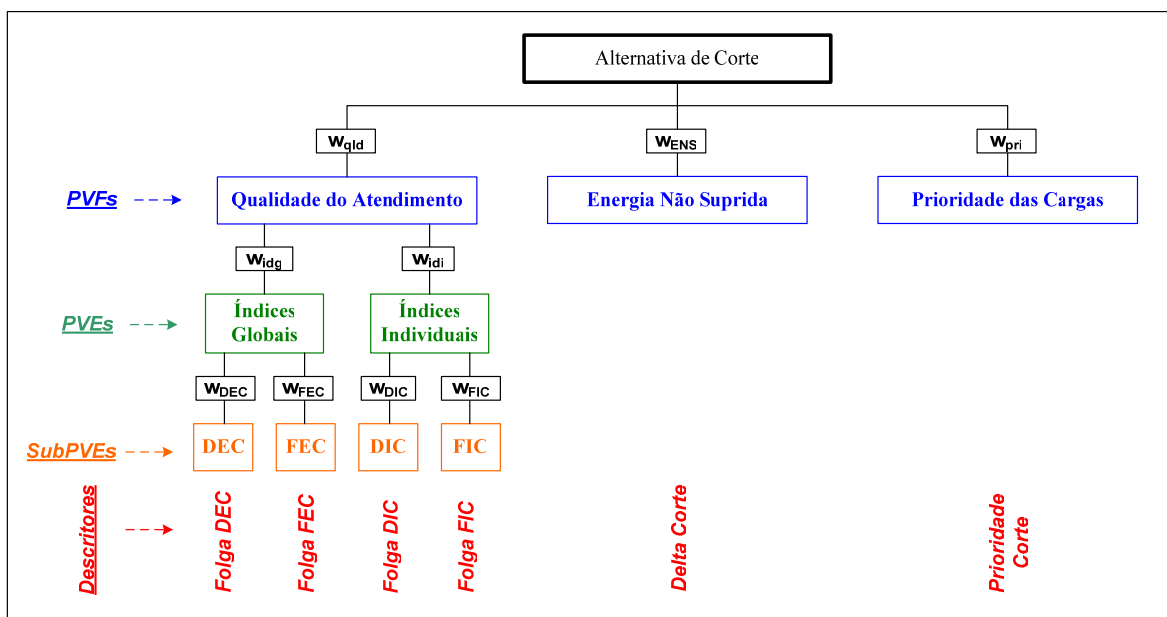


Figura 3.8 – Estrutura arborecente para a pontuação multicritério

- Funções de Valor

Os resultados da aplicação de uma metodologia de apoio à decisão dependem em grande parte da correta definição das funções de valor para cada critério selecionado. É por meio dessas funções que os descritores passam a assumir um patamar definido numa escala que atribui no máximo o valor 100 (cem). Este procedimento permite que diferentes

grandezas físicas dos critérios sejam igualmente consideradas na função de agregação que pontuará cada alternativa de corte.

Normalmente, a definição das funções de valor deve ser feita pelos decisores, sendo importante transferir para essas curvas a experiência prática, resultado de diversas situações onde a tomada de decisão seguindo um caminho determinou o sucesso ou insucesso na decisão tomada. Entretanto para fins acadêmicos, as funções de valor apresentadas na seqüência, foram baseadas em várias simulações com diferentes parâmetros, resultando em modelos plausíveis que permitem a realização dos estudos a que se propõe essa dissertação.

Mais especificamente, para cada função de valor foram simuladas diversas situações de corte de carga (variando a solicitação de corte de carga e duração estimada do corte), considerando-se como dados de entrada sistemas reais de distribuição. Para cada uma dessas situações foram calculados os valores absolutos para todos os critérios considerados, conforme metodologia descrita anteriormente. Esses valores foram agrupados por critério, permitindo a verificação da predominância de cada um deles em certas faixas de variação de valor. Assim, observando essas variações para cada critério, foram compostas as funções de valor, procurando estabelecer a maior distribuição para a pontuação multicritério justamente nas faixas onde houve maior incidência de valores nas situações simuladas.

Cabe ressaltar ainda, que com exceção do descritor “PrioridadeCorte”, as funções de valor dos demais são todas contínuas, uma vez que os valores assumidos por esses descritores são também contínuos dentro do seu domínio. Já para a “PrioridadeCorte”, a função deve ser discreta, tendo em vista que as prioridades das cargas compõem um conjunto discreto de valores.

- Funções de Valor para “FolgaDEC” e “FolgaFEC”

Para esses dois descritores considera-se a mesma função de valor, que relaciona diretamente os valores de percentual das folgas com uma nota. A função de valor adotada, formada por três funções lineares, conforme o gráfico representativo da Figura 3.9 é apresentada abaixo.

$$fv(\text{FolgaDEC e FolgaFEC}) = \begin{cases} 4x\text{Folga}, & \text{se } \text{Folga} < 0 \\ 2x\text{Folga}, & \text{se } 0 \leq \text{Folga} < 30 \\ \frac{4}{7}x\text{Folga} + \frac{300}{7}, & \text{se } 30 \leq \text{Folga} \leq 100 \end{cases} \quad (3.8)$$

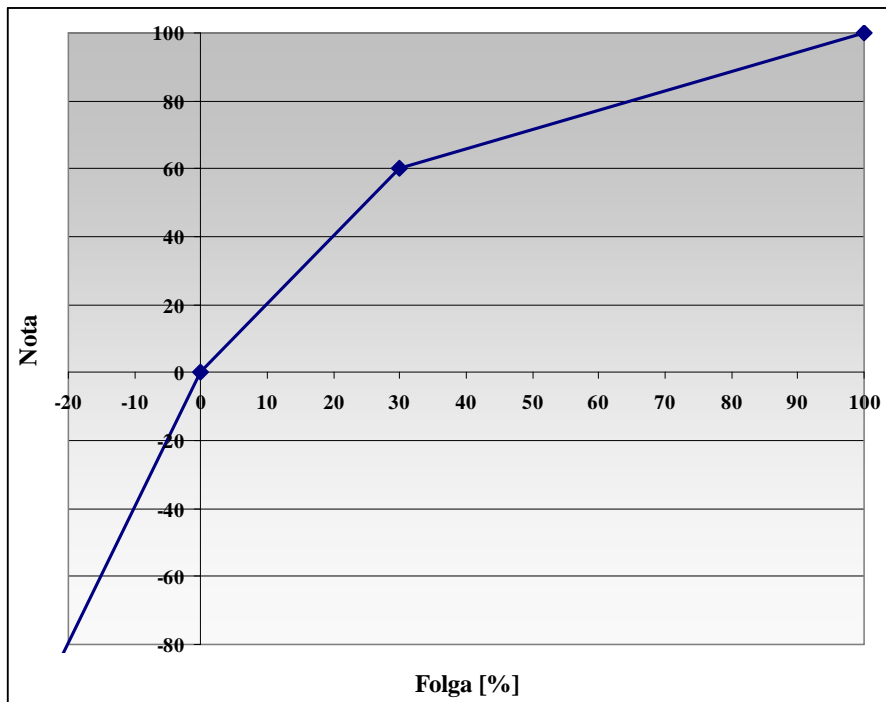


Figura 3.9 – Função de valor para FolgaDEC e FolgaFEC

- Funções de Valor para “FolgaDIC” e “FolgaFIC”

Também para esses dois descritores foi composta uma mesma função de valor, com três seções lineares conforme representado na Figura 3.10, e apresentado a seguir.

$$fv(\text{FolgaDIC e FolgaFIC}) = \begin{cases} 3x\text{Folga}, & \text{se } \text{Folga} < 0 \\ 1,5x\text{Folga}, & \text{se } 0 \leq \text{Folga} < 40 \\ \frac{4}{6}x\text{Folga} + \frac{200}{6}, & \text{se } 40 \leq \text{Folga} \leq 100 \end{cases} \quad (3.9)$$

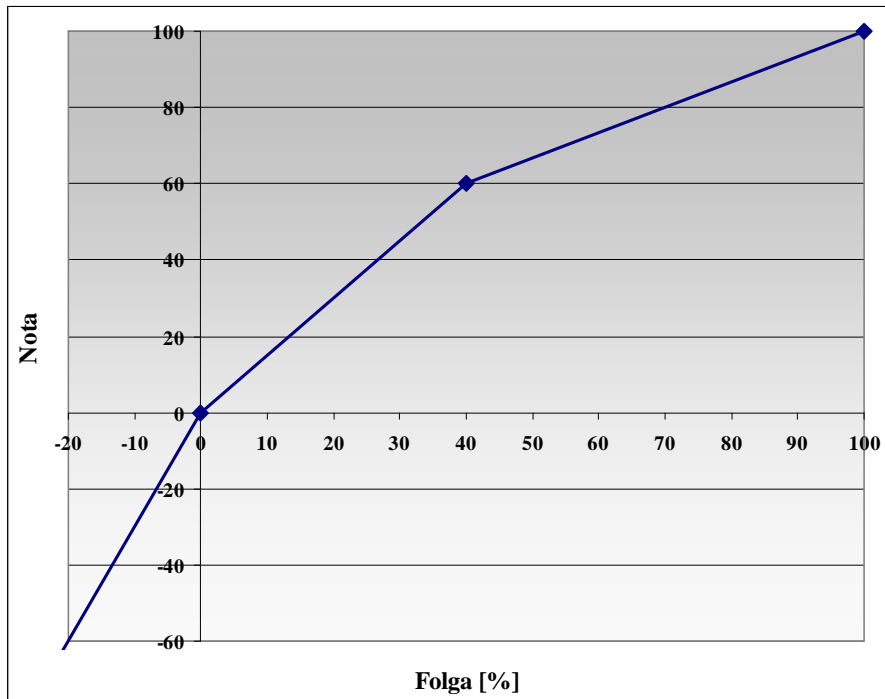


Figura 3.10 – Função de valor para FolgaDIC e FolgaFIC

- Função de Valor para “PrioridadeCorte”

Inicialmente, os valores considerados para esse atributo devem ser transformados da forma literal para numérica. Assim, partindo do menor nível de prioridade (A1) até o maior deles (C5) deve ser atribuída a numeração seqüencial de 1 (um) a 15 (quinze), conferindo ao maior número a maior prioridade de carga.

Com isso, utilizando-se as funções discretas indicadas abaixo, tem-se a função de valor desse descritor conforme o gráfico da Figura 3.11.

$$f_v(PrioridadeCorte) = \begin{cases} -7,5xPri + \frac{215}{2}, & se Pri \in [1,2,3,4,5] \\ -7,5xPri + 105, & se Pri \in [6,7,8,9,10] \\ -4xPri + 64, & se Pri \in [11,12,13,14,15] \\ -\infty, & se Pri > PrioridadeAdmitida \end{cases} \quad (3.10)$$

Com relação à máxima prioridade de carga aceita para o corte, o equacionamento mostra que as alternativa que infringirem essa restrição serão severamente penalizadas na função valor em questão, o que levará ao seu descarte como solução viável ao problema.

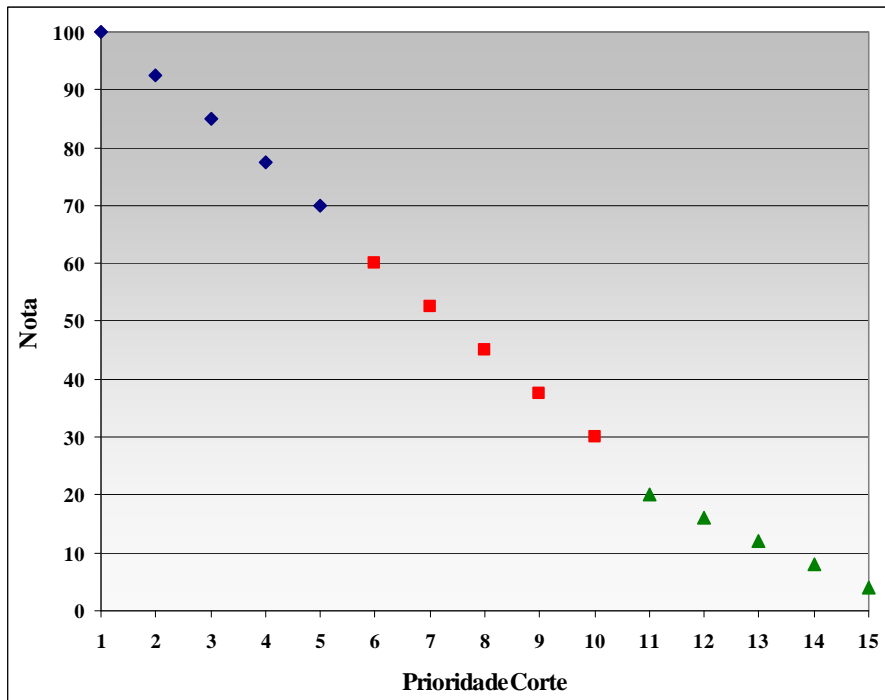


Figura 3.11 – Função de valor para PrioridadeCorte

- Função de Valor para “DeltaCorte”

Três funções lineares compõe essa função de valor, destacando que no caso de valores negativos para o “DeltaCorte”, compreendidos entre zero (0) e a máxima tolerância para cortes abaixo do solicitado, a função deve assumir a mesma nota que seria dada caso o descritor fosse positivo.

$$f_v(\Delta\text{Corte}) = \begin{cases} -2,5x\Delta\text{Corte} + 100, & \text{se } 0 \leq \Delta\text{Corte} \leq 20 \\ -\frac{5}{3}x\Delta\text{Corte} + \frac{250}{3}, & \text{se } 20 < \Delta\text{Corte} \leq 50 \\ -2x\Delta\text{Corte} + 100, & \text{se } \Delta\text{Corte} > 50 \\ -\infty, & \text{se } \Delta\text{Corte} < -\text{Tolerância} \end{cases} \quad (3.11)$$

$$f_v(\Delta\text{Corte}) = f_v(|\Delta\text{Corte}|), \quad \text{se } |\Delta\text{Corte}| \leq \text{Tolerância}$$

Novamente no caso de violação da restrição, o critério sofre uma penalização que acarretará no descarte da alternativa de corte que estiver sendo avaliada.

A figura abaixo mostra o gráfico dessa função de valor, conforme o equacionamento apresentado.

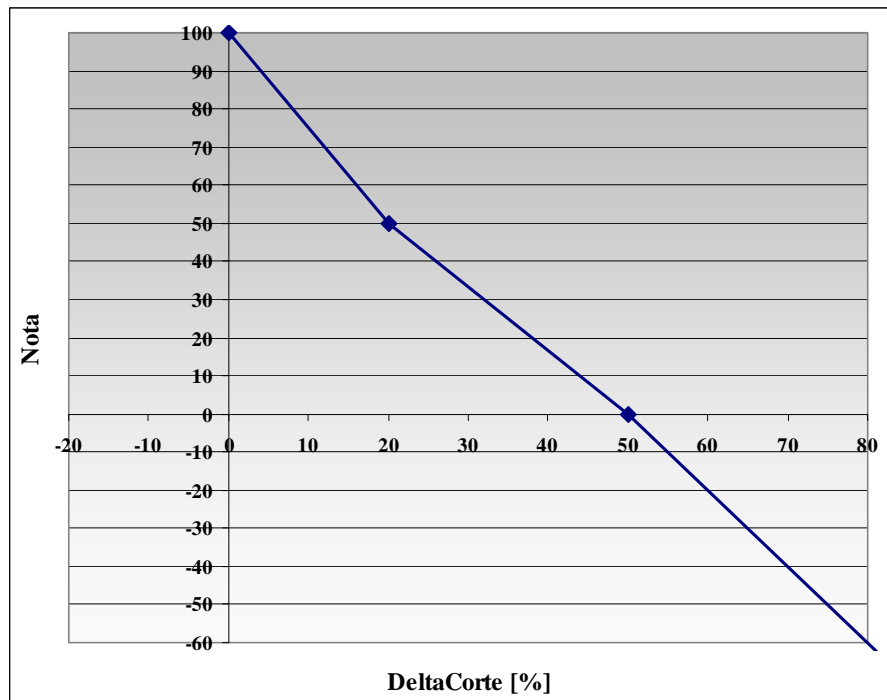


Figura 3.12 – Função de valor para DeltaCorte

- Função de Agregação

O objetivo final da avaliação multicritério é alcançado por meio de uma Função de Agregação (FA), que confere a cada alternativa de corte de carga avaliada, uma pontuação global segundo os critérios e pesos adotados. Quanto mais elevada for essa nota global, melhor classificada estará a solução no contexto multicritério para o corte de carga.

O valor obtido por uma alternativa de corte “a”, levando em conta as taxas de substituição (pesos) e as funções de valor apresentadas anteriormente é dado pela seguinte função de agregação:

$$\begin{aligned}
 FA_a = & w_{ENS} fV(\Delta Corte) + w_{pri} fV(Pri) + w_{qld} \{w_{idg} [w_{DEC} fV(FgDEC) + \dots \\
 & + w_{FEC} fV(FgFEC)] + w_{idi} [w_{DIC} fV(FgDIC) + w_{FIC} fV(FgFIC)]\}
 \end{aligned}
 \tag{3.12}$$

3.3.3 Otimização do Corte de Carga via SGA

A primeira das duas metodologias desenvolvidas para otimização multicritério do desligamento dos alimentadores na situação de corte de carga, tem como base um algoritmo genético básico (SGA), apresentado por Goldberg (1989).

Para facilitar o entendimento da metodologia proposta para otimização do corte de carga utilizando algoritmo genético, faz-se na seqüência uma breve descrição sobre essa técnica apresentando os principais conceitos e operadores envolvidos.

3.3.3.1 Breve Introdução sobre Algoritmos Genéticos

Conforme já comentado no item 2.4.2.1, os Algoritmos Genéticos (AG) são algoritmos de busca inspirados no processo da seleção natural, proposto por Charles Darwin, cujos fundamentos teóricos foram inicialmente apresentados por John Holland em 1975 (Holland, 1975).

Eles representam uma classe de algoritmos de otimização que empregam mecanismos probabilísticos de busca de soluções, baseado no processo de evolução biológico, combinando aspectos da mecânica da genética e da seleção natural de indivíduos.

O primeiro passo na otimização via AG consiste na geração da população inicial de indivíduos representados por seus cromossomos. Existem algumas maneiras para se gerar essa população, sendo comumente obtida por meio da geração aleatória de indivíduos, atendendo condições de contorno previamente estabelecidas de acordo com o problema. O número de indivíduos componentes da população é um critério que envolve certa heurística, podendo variar para cada problema. Contudo, quanto maior o número de elementos, maior a probabilidade de convergência e maior o esforço computacional.

Na seqüência, os AG realizam o processo evolutivo aplicando alguns operadores genéticos sobre essa população, buscando otimizar a aptidão dos indivíduos. Os operadores de um SGA, que apresenta bons resultados para muitos problemas práticos, são a reprodução, *crossover* e mutação.

A reprodução é o mecanismo de seleção natural, que prioriza os indivíduos de maior adaptabilidade ao meio na geração de novos indivíduos e evolução da população de

soluções. Assim, esses cromossomos conseguem se reproduzir com maior frequência, transmitindo suas características genéticas aos descendentes nas novas gerações, que representam o número da iteração que o AG executa.

Nesse processo de composição de uma nova geração por meio da reprodução dos indivíduos mais aptos, com determinadas probabilidades ocorrem as operações de *crossover* e mutação, responsáveis pela recombinação dos códigos genéticos dos cromossomos selecionados para reprodução e modificação dos genes dos indivíduos gerados.

O cruzamento ou *crossover* se dá pela troca arbitrária de parte dos cromossomos entre dois indivíduos selecionados para reprodução (cromossomos pais). Esse processo resulta em dois indivíduos diferentes, mas que ainda guardam influência dos pais. Já a mutação é a denominação dada ao mecanismo de alteração genética responsável por modificar alguns genes de indivíduos de uma população, buscando inserir novas características ou recuperar algumas que foram perdidas durante o processo evolutivo.

Com a utilização desses operadores genéticos de caráter aleatório, os descendentes gerados poderão apresentar características distintas de seus ancestrais, que podem fazer com que eles tenham maior aptidão, ou seja, representam melhores soluções para o problema.

3.3.3.2 Algoritmo Genético Proposto Para o Corte de Carga

Com o intuito de otimizar as ações de desligamento dos alimentadores para atender a solicitação de corte de carga, o algoritmo genético proposto nesse trabalho, está sintetizado no fluxograma da Figura 3.13.

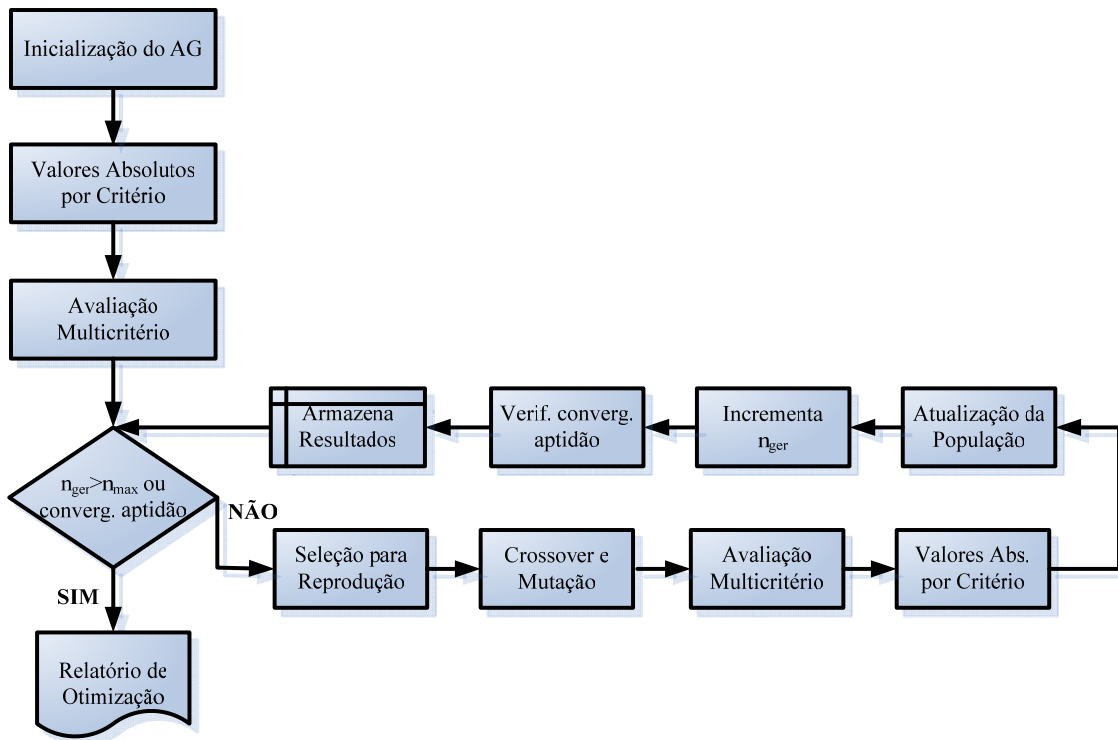


Figura 3.13 – Algoritmo para otimização do desligamento de alimentadores via SGA

Esse algoritmo se baseia no SGA apresentado em Goldberg (1989) e para melhor esclarecer a metodologia proposta, os principais blocos de operação serão descritos a seguir, enfatizando as atribuições de cada um deles.

I) Inicialização do AG

É importante lembrar que antes da execução do algoritmo de corte de carga por meio do desligamento de alimentadores, a metodologia proposta na Figura 3.1 aponta que o processo se inicia com a leitura dos dados de carregamento dos alimentadores e demais informações referentes aos seus indicadores de continuidade presentes no banco de dados, indicação do montante de demanda ativa solicitada para o corte e redução dessa necessidade por meio da regulação da tensão de despacho das SEs.

Já a etapa de inicialização do AG compreende a definição de algumas variáveis importantes para a ferramenta de inteligência artificial em questão e contempla também o processo de geração da população inicial de indivíduos.

Os principais parâmetros solicitados pelo AG nessa fase de início do processo de otimização, denominados de parâmetros de controle, são: tamanho da população e as probabilidades de cruzamento e mutação. A configuração desses parâmetros é um dos aspectos mais relevantes para o sucesso e eficiência do algoritmo de busca. Entretanto essas informações dependem muito do problema a que está sendo aplicado o AG, sendo que a literatura sobre esse tema é escassa.

- *Tamanho da População (N)*

Esse parâmetro indica o número de cromossomos na população, que será constante durante as gerações (iterações). Uma grande população apresentará uma maior diversidade de soluções, contudo, computacionalmente serão dispendiosas tantas avaliações de funções de aptidão. Assim, a principal influência deste parâmetro está relacionada com o desempenho global e a eficiência dos AGs. Muitos pesquisadores sugerem tamanhos de população entre 20 e 100 cromossomos (Castro, 2001).

- *Probabilidade de Cruzamento ou Crossover (Pc)*

A probabilidade de cruzamento está relacionada à taxa com que os indivíduos selecionados para reprodução sofrerão *crossover*. Uma maior probabilidade fará com que mais rapidamente novos cromossomos (soluções) sejam introduzidos na população. Por outro lado, se for muito elevada, soluções com boas aptidões poderão ser dizimadas da população de indivíduos. A ordem de grandeza típica para esse parâmetro está entre 50% e 95%, uma vez que valores muito baixos tornam o processo muito lento.

- *Probabilidade de Mutação (Pm)*

Esse parâmetro indica a probabilidade com que haverá mutação nos genes dos cromossomos da população no decorrer das iterações. A mutação permite que novas características sejam incluídas na população, prevenindo a convergência prematura de todos os cromossomos para uma mesma solução, possibilitando maior varredura do espaço de busca.

Também esse parâmetro de configuração do AG depende do problema a ser resolvido, mas a maioria das taxas utilizadas na literatura varia entre 0,1% e 1%. Valores muito elevados de mutação podem tornar o processo de busca essencialmente aleatório, devendo portanto, serem evitados.

- *Geração da População Inicial*

Alguns trabalhos, como Goldberg (1989) e Cantú-Paz (1995), mostram que a geração da população inicial não é crítica para o AG, desde que a mesma contenha cromossomos suficientemente variados.

No algoritmo proposto, essa etapa se dá de forma totalmente aleatória, para não forçar a repetição dos mesmos cromossomos e cobrir uma diversa gama de soluções já na população inicial. Dessa forma, cada cromossomo é composto gene a gene por meio de um sorteio randômico, com iguais chances de atribuir o *bit* 1 ou 0.

Com o objetivo de possibilitar a análise comparativa entre variações na configuração dos parâmetros de influência no AG (P_c e P_m), a metodologia proposta permite que, para um caso de estudo, seja armazenada uma mesma população inicial para servir como *start* do processo de busca para todos os casos de configurações desejadas.

II) Valores Absolutos por Critério

Para possibilitar o cômputo de uma pontuação, considerando todos os critérios simultaneamente, é preciso inicialmente valorar cada um dos critérios individualmente, em valores absolutos referentes à sua grandeza.

Esse procedimento é realizado segundo a metodologia apresentada no tópico 3.3.2.1, considerando os critérios FolgaDEC, FolgaFEC, FolgaDIC, FolgaFIC, PrioridadeCorte e DeltaCorte, avaliando todos indivíduos da população inicial bem como os cromossomos gerados ao longo da evolução.

III) Avaliação Multicritério

Essa etapa é o ponto chave na metodologia de otimização proposta, sendo responsável por diferenciá-la das demais ferramentas de otimização baseadas em SGA. O ponto em questão diz respeito à avaliação de cada indivíduo da população, considerando-se a metodologia de avaliação multicritério apresentada anteriormente.

Assim, cada indivíduo receberá uma aptidão de acordo com o cálculo da pontuação multicritério, que leva em conta as taxas de substituição atribuídas pelo decisor a cada ponto de vista e as funções de valor mostradas anteriormente. Portanto, a aptidão ou nota, atrelada a cada cromossomo, é obtida de acordo com a função de agregação descrita em

(3.12). Vale lembrar que quanto maior for essa nota, maior a “qualidade” do indivíduo, logo se trata de um problema de maximização das aptidões.

Cabe destacar que não há a necessidade de se calcular derivadas de funções objetivo, tornando o AG flexível para ser utilizado também para otimizar funções não diferenciáveis.

IV) Critério de Parada

O AG segue com o processo evolutivo, buscando melhorar a aptidão das soluções a cada nova geração, até que algum critério de parada seja verificado nesse percurso. No presente algoritmo, dois critérios de parada são sugeridos e estão disponíveis como opção: parada por número máximo de gerações e por convergência da aptidão.

O primeiro critério é um dispositivo que compara o número da iteração atual com um número máximo de iterações, ou gerações, desejado. Alcançado esse valor máximo de gerações, o AG encerra o processo de busca. Assim, certamente um número muito pequeno atribuído a esse parâmetro pode apresentar uma solução insipiente, bem como o extremo oposto, um número muito grande de gerações, pode requerer um tempo demasiadamente elevado para término do processo.

O segundo critério sugerido é a parada por convergência da aptidão. Nesse critério, define-se previamente um número máximo de gerações, que no caso de apresentarem consecutivamente o mesmo valor para a aptidão máxima entre todos os indivíduos da população, encerra-se o processo evolutivo.

V) Seleção para Reprodução

O artifício usado para seleção dos cromossomos para reprodução deve se basear no princípio da “perpetuação dos melhores indivíduos”, como sugere a lógica evolucionária, assegurando que as melhores soluções tenham maior probabilidade de repassarem suas características às próximas gerações.

A literatura aponta uma vasta gama de métodos para realizar este processo de seleção, sendo que para este trabalho se optou por utilizar o esquema de seleção por torneio, conhecido por não acarretar convergência prematura além de ser um método que

combate a estagnação das soluções ao longo das gerações e não exige nenhum esforço computacional extra com ordenamento.

A sua implementação computacional é bastante simples, mas com bons resultados encontrados. A idéia é promover um torneio entre um grupo, com no mínimo dois indivíduos tomados aleatoriamente da população. Entre esses indivíduos procede-se um torneio sendo que o vencedor, que será o escolhido, é aquele com o maior valor de aptidão no grupo. Deste modo, realiza-se o torneio N vezes compondo uma população temporária, de tamanho N , com os indivíduos selecionados pelo processo de disputa recém descrito. O número de indivíduos tomados para o torneio no caso do AG implementado é de 10% do tamanho da população.

VI) *Crossover* e *Mutação*

A etapa de seleção não introduz novos indivíduos na população temporária, apenas seleciona aqueles que poderão ser os genitores para novos descendentes gerados por meio da operação de cruzamento ou *crossover*.

O cruzamento entre dois genitores escolhidos dessa população temporária é aprovado por um processo de decisão que realiza o sorteio de um valor aleatório entre 0 e 1. Se este valor for inferior à probabilidade de cruzamento (P_c) o cruzamento é realizado, caso contrário não há cruzamento e outros dois genitores serão escolhidos para o teste. Esse processo se repete até que todos os pares tenham passado por essa avaliação e eventual cruzamento.

O operador genético cruzamento, também conhecido como *crossover*, foi implementado de três maneiras no AG proposto, sendo que o decisor pode optar por uma delas ao operar o algoritmo. Essas três opções são:

Ponto único: um ponto de cruzamento é escolhido aleatoriamente e a partir dele as informações genéticas dos pais são trocadas, de acordo com o exemplo da Figura 3.14.

Dois pontos: segue a mesma lógica do ponto único, entretanto nesse caso dois pontos são escolhidos aleatoriamente e entre eles é feita a troca de bits.

Uniforme: nesse caso não se utilizam pontos de cruzamento, mas uma máscara é gerada aleatoriamente com o mesmo tamanho do cromossomo. Os descendentes são gerados pela seguinte lógica: se o *bit i* na máscara for igual a um (1), então o *bit i* de um dos descendentes será igual ao *bit i* de um dos genitores e o mesmo gene do outro descendente será igual ao gene do outro genitor. Esse processo é feito verificando-se todos os genes da máscara.

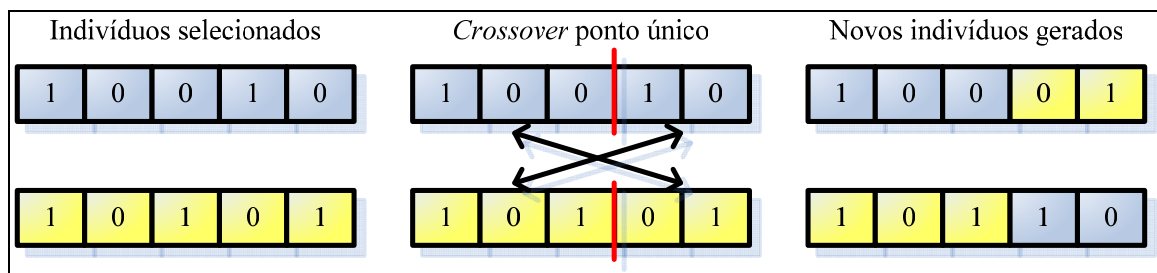


Figura 3.14 – Exemplo de *crossover* ponto único

Após a execução das operações de cruzamento entre os pares de genitores, tem-se uma nova população temporária. É nesses indivíduos que se verifica a aplicação do operador de mutação, procurando introduzir e manter a diversidade genética da população, alterando aleatoriamente um ou mais indivíduos dessa população, como ilustrado na Figura 3.15. Esse operador de mutação é aplicado aos indivíduos de acordo com a probabilidade de mutação P_m .

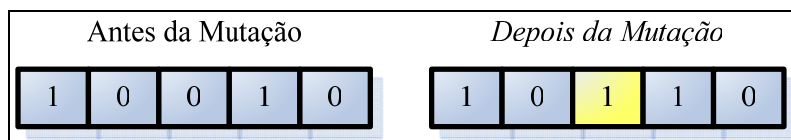


Figura 3.15 – Exemplo de mutação

VII) Atualização da População

Com a etapa de seleção, compõe-se uma população temporária, com o mesmo tamanho da população permanente¹⁵, sobre a qual se aplicam os operadores de cruzamento e mutação. Ao final desse processo, tem-se um conjunto de indivíduos com características diferentes dos seus ancestrais. Muitos deles são mais aptos do que seus genitores, ou seja, têm uma pontuação multicritério maior, mas da mesma forma alguns cromossomos representam soluções piores dentro da avaliação multicritério adotada.

¹⁵ Entende-se por população permanente aquela que vai evoluindo a cada geração, da qual são escolhidos os indivíduos para compor um conjunto temporário sobre o qual são aplicados os operadores genéticos.

Dessa forma, como foi adotada a premissa de manter a população fixa, é necessário estabelecer uma forma para inserir esses novos indivíduos na população permanente. Duas práticas são comumente adotadas e foram implementadas na metodologia proposta.

A primeira maneira de realizar essa tarefa é substituindo todos os elementos da população antiga pelos presentes na população temporária, entretanto com isso pode-se estar jogando fora indivíduos muito bem pontuados e tornar o processo de busca mais aleatório e demorado.

Para sanar essa deficiência, o segundo método de atualização da população implementado consiste na substituição elitista, que insere na população permanente apenas os indivíduos da população temporária que são melhores do que os já presentes nela. A principal vantagem do elitismo é garantir que não se perca o melhor indivíduo durante o processo evolutivo, gerando com isso uma seqüência monotônica, onde as aptidões da população não pioram.

VIII) Verificação da Convergência da Aptidão

Essa etapa de verificação é necessária caso o critério de parada escolhido seja o de convergência da aptidão. O procedimento consiste em comparar a aptidão do melhor indivíduo das últimas n gerações, onde n é um número inteiro positivo definido como parâmetro para o critério de parada por convergência. Se essa aptidão se mantiver constante, significa que o processo não está mais evoluindo para soluções melhores e dessa forma entende-se que houve a convergência do algoritmo para a melhor solução apontada.

IX) Armazenamento dos Resultados

Para permitir a análise estatística da evolução das soluções encontradas ao longo das gerações e até mesmo permitir que o procedimento de verificação descrito anteriormente possa ser realizado, o algoritmo deve armazenar a cada nova geração dados relevantes sobre a população que foi formada, como: aptidões máxima e média dos indivíduos da população e o número de operações de cruzamento e mutação realizados.

X) Relatório de Otimização

Ao final do processo de busca, o algoritmo apresenta como saída um relatório (conforme mostrado na Figura 3.16) contendo uma diversa gama de informações que

permitem avaliar o desempenho do AG, bem como obter informações relevantes sobre a melhor solução encontrada, indicando quais alimentadores devem ser desconectados para obter o menor prejuízo a todos os critérios.

Número total de gerações.....:	100
Total de substituições.....:	260
Nr. de operações de mutação....:	1061
Nr. de operações de crossover..:	2211
Melhor Solução (encontrada na 5ª geração)	
Corte Sugerido..:	AL03 AL04 AL12
Pontuação.....:	59,782
Prioridade.....:	B1
Delta Corte.....:	04,38845% = 0219,423kW
Folga DEC.....:	12,941%
Folga FEC.....:	12,000%
Folga DIC.....:	45,333%
Folga FIC.....:	10,000%

Figura 3.16 – Exemplo de relatório de otimização

3.3.4 Otimização do Corte de Carga via AG multicritério

O segundo método para otimização do corte de carga envolvendo o desligamento de alimentadores foi implementado baseando-se em um algoritmo genético que incorpora os princípios da otimização multicritério na sua lógica de funcionamento, apresentado por Castro (2001), denominado PMOGA (*Pareto Multiobjective Genetic Algorithm*).

Esse método avalia os critérios conjuntamente, usando as definições já apresentadas de relação de dominância, segundo a lógica de Pareto, gerando ao final do processo um determinado número de soluções não dominadas. Essas por sua vez, são avaliadas segundo a metodologia de pontuação multicritério mostrada anteriormente, obtendo-se uma classificação para as soluções de acordo com os pesos inferidos para cada critério pelo decisor.

É interessante ressaltar que nenhuma das soluções nesse conjunto é necessariamente melhor do que qualquer outra em todos os critérios, portanto dessa forma, qualquer uma das soluções nesse conjunto é aceitável. A escolha de uma solução perante as demais é um problema que envolve inúmeros fatores, estando essa decisão fortemente relacionada com o agente responsável pela tomada de decisão. Dessa forma, é bastante interessante para o processo de otimização multicritério que todas as soluções ótimas de Pareto sejam conhecidas, possibilitando que a tomada de decisão seja feita considerando todas as soluções não-dominadas.

Para contribuir com o entendimento dessa metodologia proposta, tem-se na seqüência uma breve descrição sobre essa ferramenta de otimização multicritério via algoritmo genético, chamada PMOGA.

3.3.4.1 Breve Introdução sobre PMOGA

Esse algoritmo segue a mesma lógica evolucionária dos algoritmos genéticos, comentada em tópicos antecedentes, empregando mecanismos probabilísticos de busca de soluções que se baseiam em mecanismos de genética e seleção natural dos indivíduos. Também a mesma codificação é adotada para os cromossomos, que representam uma solução no espaço de busca do problema.

Entretanto, esse AG para problemas de otimização multicritérios tem por finalidade evoluir um conjunto uniformemente distribuído de soluções pertencentes ao conjunto ótimo de Pareto. O algoritmo funciona com a manutenção de uma população externa à principal, que serve como um filtro para armazenar o conjunto de soluções não-dominadas, determinado desde a população inicial e que participa nas operações genéticas.

Dessa forma, a cada iteração do processo de busca, faz-se necessário o uso de operações indispensáveis para a identificação e operação com os indivíduos, de acordo com critérios de dominância que seguem a lógica de Pareto.

Essas principais etapas, que diferenciam o PMOGA do SGA são: definição de um filtro para reter as soluções de Pareto e elitismo deste filtro nas gerações; ordenamento da população de acordo com propriedades de dominância; utilização de operadores multicritérios de exclusão e adição.

Destaca-se aqui o procedimento de ordenamento não-dominado, essencial para o desenvolvimento dessa metodologia de otimização. Segundo ele, toda a população é verificada e todos os indivíduos não-dominados recebem uma posição ou ordem 1 (um). Os outros indivíduos são posicionados segundo a sua não dominância em relação ao restante da população. A rotina de seleção usa esse ordenamento para selecionar indivíduos para reprodução, sendo que tanto o operador de cruzamento quanto o operador de mutação são os usuais da técnica de SGA.

Em termos de inicialização do processo de busca, da mesma forma que no SGA, o primeiro passo consiste na definição dos parâmetros de controle do algoritmo e geração da população inicial de indivíduos. Na seqüência, essa população passa por etapas de ordenamento, cópia das soluções não dominadas para um filtro e aplicação de operadores genéticos multicritérios que evoluem a população a cada geração na busca de melhores soluções da fronteira ótima de Pareto.

3.3.4.2 Algoritmo Genético Multicritério para o Corte de Carga

O algoritmo genético multicritério, baseado no PMOGA de Castro (2001), desenvolvido para otimização do desligamento de alimentadores visando o corte de carga está diagramado no fluxograma da Figura 3.17. Para esclarecer a metodologia proposta, os principais blocos de operação serão descritos na seqüência, com foco nas características importantes de cada um deles.

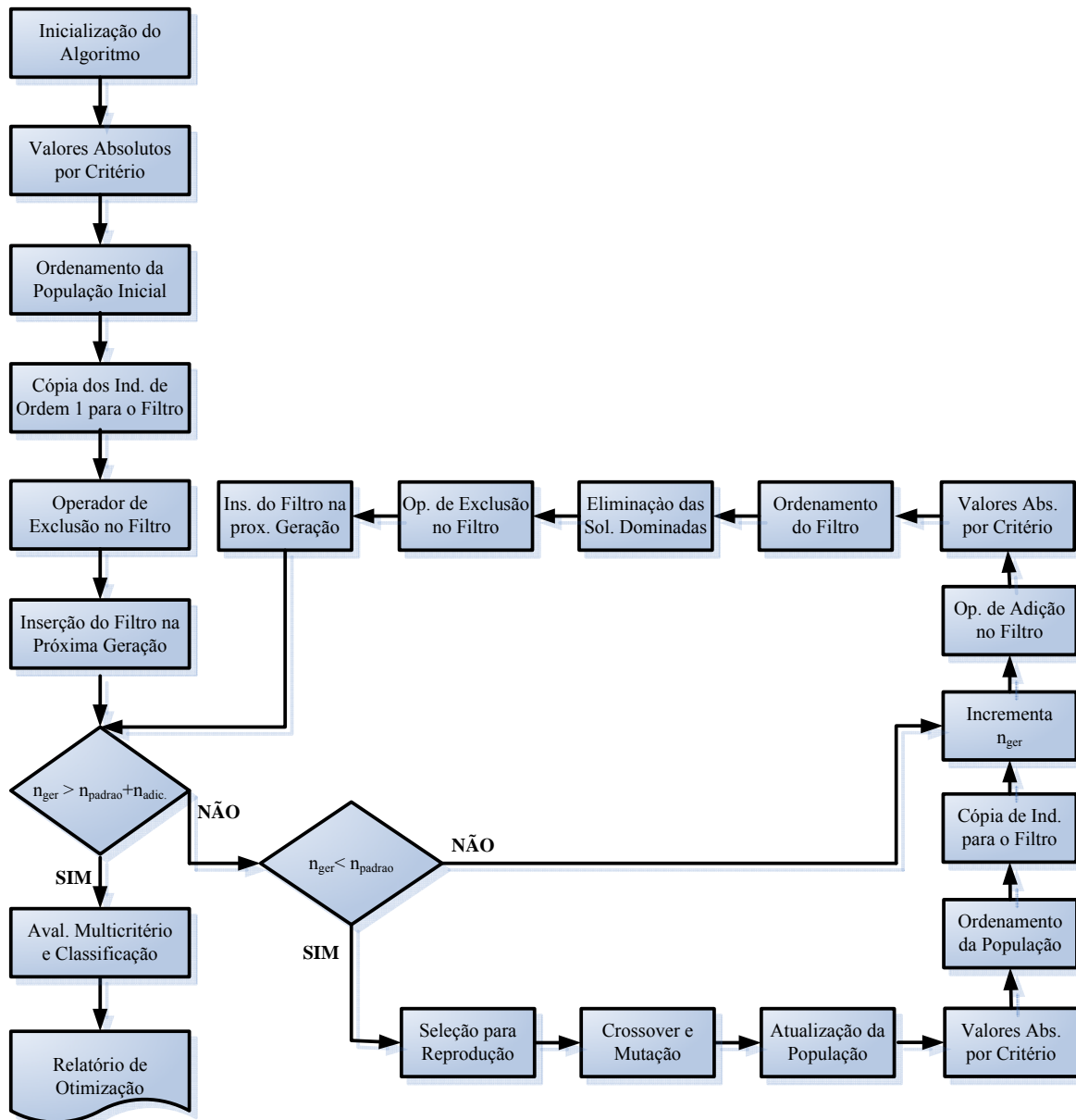


Figura 3.17 - Algoritmo para otimização do desligamento de alimentadores via PMOGA

I) Inicialização do Algoritmo

Conforme já salientado no tópico explicativo sobre a inicialização do SGA, antes da execução de qualquer um dos módulos de otimização das ações de desligamento de cargas, a metodologia de corte de carga proposta se inicia com a leitura dos dados de carregamento dos alimentadores e demais informações referentes aos seus indicadores de continuidade presentes no banco de dados, indicação do montante de demanda ativa

solicitada para o corte e redução dessa necessidade por meio da regulação da tensão de despacho das SEs.

Com respeito à inicialização do algoritmo apresentado na Figura 3.17, os principais parâmetros de controle do AG são os mesmos descritos no SGA e seguem as mesmas recomendações, sendo eles: tamanho da população (N_{pop}) e as probabilidades de cruzamento (P_c) e mutação (P_m).

Entretanto, para o PMOGA é necessária também a definição do tamanho de uma população (N_{filtro}) externa à principal, chamada de filtro, que será responsável por reter, ao longo das gerações, as soluções não-dominadas, pertencentes à fronteira ótima de Pareto.

Também com relação à geração da população inicial, o procedimento é o mesmo comentado anteriormente, com a utilização de um sorteio randômico para cobrir uma vasta área do espaço de busca do problema. O algoritmo permite também o congelamento de uma mesma população inicial para a realização de novos estudos, variando-se os parâmetros de controle P_m e P_c .

II) Valores Absolutos por Critério

Essa etapa segue o mesmo princípio apresentado para o SGA, sendo muito importante para que o PMOGA possa realizar a verificação das relações de dominância entre as soluções, responsável pelo ordenamento dos indivíduos.

Esse procedimento é realizado para avaliação de todos os indivíduos da população inicial, aqueles gerados ao longo da evolução e também os novos cromossomos introduzidos no filtro por meio da operação de adição, conforme mostrado no fluxograma.

III) Ordenamento

Consiste na realização de um teste de dominância sobre todo o conjunto ao qual se deseja ordenar, de acordo com as definições 1 e 2 apresentadas no tópico 2.4.4.1. As soluções não-dominadas do conjunto recebem a ordem 1 (um) e são separadas da população. Na seqüência um novo teste é efetuado sobre o conjunto remanescente e as novas soluções não-dominadas recebem a ordem 2. Desse modo, repete-se esse procedimento até que todas as soluções do conjunto especificado tenham sido ordenadas.

Ao final do processo se obtêm diferentes ordens que correspondem às várias fronteiras ou camadas de dominância existentes no conjunto ordenado. Quanto menor for a ordem de uma solução, mais próxima da fronteira ótima de Pareto ela estará.

Este procedimento é aplicado tanto na população inicial quanto na população principal, que passa por modificações ao longo das gerações, e no filtro de soluções não-dominadas, após a inserção de novos indivíduos em sua composição.

É importante destacar que as soluções que violam alguma das restrições impostas ao problema (tolerância para cortes inferiores ao solicitado e prioridade de carga limite para o corte) não são classificadas como ordem 1, sendo essa a sistemática elaborada nesse trabalho para lidar com as restrições.

IV) Cópia de Indivíduos para o Filtro

O algoritmo proposto possui um filtro para armazenar as soluções não-dominadas que vão surgindo ao longo do processo evolutivo. Assim, após o ordenamento da população a cada nova geração de indivíduos, as soluções não-dominadas, ou seja, de ordem 1, são adicionadas ao filtro.

V) Operador de Exclusão no Filtro

O filtro que possui as soluções de primeira ordem é, na verdade, uma população externa à principal com tamanho fixo. Após a inserção de novas soluções, possivelmente o seu tamanho máxima seja extrapolado. Nesse caso, o algoritmo dispõe do operador de exclusão, que elimina a cada iteração a solução mais próxima de outras soluções no filtro, com o intuito de propiciar uma melhor distribuição dos indivíduos ao longo do conjunto de Pareto. Esse procedimento é repetido até que o filtro corrente alcance o tamanho especificado (N_{filtro}).

A forma utilizada para verificar as distâncias entre os indivíduos é dada pela equação (3.13), que resulta da soma das porcentagens das distâncias entre todas as funções objetivo (f_o) – que são os diferentes critérios, para duas soluções j e k .

$$d_{j,k} = \sum_{i=1}^{n.f_o} \frac{100 \cdot |f_{o_i}(j) - f_{o_i}(k)|}{(f_{o_i}(j) + f_{o_i}(k))/2} \quad (3.13)$$

No problema de corte de carga, o operador de exclusão é calculado para cada cromossomo em comparação com todos os demais, segundo os valores absolutos dos critérios considerados: *FolgaDEC*, *FolgaFEC*, *FolgaDIC*, *FolgaFIC*, *PrioridadeCorte* e *DeltaCorte*.

VI) Inserção do Filtro na Próxima Geração

Para garantir que as soluções de primeira ordem retidas no filtro, sejam perpetuadas para as próximas gerações e participem da evolução genética, procede-se a inserção de todos cromossomos do filtro na nova geração principal, antes mesmo de iniciar o processo de reprodução e geração de novos indivíduos. Esse elitismo do filtro na população serve para aumentar a pressão de seleção e também a convergência das soluções para a fronteira ótima de Pareto.

VII) Critério de Parada

No caso do PMOGA, o critério de parada utilizado é a contagem do número de gerações, sendo estabelecido portanto um número máximo de iterações permitidas. Entretanto, por característica do algoritmo há dois valores que devem ser definidos, um com respeito a gerações padrão e outro a gerações adicionais.

As gerações padrão são aquelas que contemplam tanto a geração de nova população de indivíduos, quanto operações genéticas realizadas para melhorar as soluções contidas no filtro. Já nas gerações adicionais, apenas os cromossomos pertencentes ao filtro sofrem operações que objetivam melhorar a distribuição da fronteira de Pareto. Essas gerações adicionais são mais rápidas e melhoram significativamente a qualidade do conjunto final de soluções.

VIII) Seleção para Reprodução

O procedimento de seleção adotado é o torneio, realizado diretamente sobre as ordens de cada indivíduo, sendo que o número de soluções tomadas para o torneio é igual a 10% do tamanho da população. Deste modo, os indivíduos são selecionados pelas suas aptidões dentro do contexto multicritério de dominância, dispensando cálculos adicionais de aptidões novas ou modificadas, como necessário em outros métodos.

Esse procedimento é realizado usando como fonte para seleção a população existente na atual geração. O objetivo da seleção é escolher pares de indivíduos que serão os genitores no processo de reprodução que irá compor uma nova população. Assim, como o filtro já foi incluído nessa nova população, esse processo de seleção dos pares de indivíduos acontece n vezes, onde n é igual o tamanho da população principal subtraída do tamanho do filtro.

IX) Crossover e Mutação

Após selecionados para reprodução, cada par de indivíduos genitores atravessa o processo de reprodução que, de acordo com as probabilidades P_c e P_m , pode passar pelos operadores de cruzamento e mutação, realizados da mesma maneira que para o caso do SGA.

X) Atualização da População

Uma vez composta a nova geração de indivíduos, na qual já contam as soluções de primeira ordem presentes no filtro e os novos indivíduos gerados pelo processo de reprodução, a próxima etapa é a atualização da população.

Esse procedimento é realizado por meio da substituição de todos os indivíduos da antiga população por essa nova prole gerada. Cabe lembrar que as melhores soluções não são perdidas nesse caminho, uma vez que as mesmas estavam presentes no filtro.

XI) Operador de Adição no Filtro

Assim como o operador de exclusão, o de adição também tem o objetivo de melhorar a distribuição das soluções pela fronteira de ótima de Pareto. Esse operador é aplicado aos indivíduos do filtro, buscando encontrar as duas soluções mais distantes no espaço de busca de cada critério e as recombina, por meio de *crossover*, n vezes. O valor adotado para n na metodologia proposta é de 5 vezes.

A idéia do operador é gerar soluções que ocupem o espaço vazio encontrado entre tais soluções, melhorando deste modo, a distribuição da fronteira ótima.

XII) Eliminação das Soluções Dominadas

Com essas recombinações entre os indivíduos do filtro, este pode passar a ter soluções dominadas em seu conjunto. Portanto, após nova ordenação de todos os

cromossomos do filtro, procede-se a eliminação das soluções que não forem de primeira ordem.

XIII) Avaliação Multicritério e Classificação

Ao final do processo de otimização, todas as soluções presentes no filtro são soluções da fronteira ótima de Pareto e portanto, não há uma única que seja melhor do que todas as demais em todos os critérios considerados. Além de que todas são soluções factíveis para o corte de carga.

Entretanto, essas soluções podem ser julgadas de acordo com a metodologia de pontuação multicritério, já esclarecida em tópicos anteriores. Dessa forma, tem-se uma nota atribuída a cada indivíduo, que representa uma solução para o corte de carga, de acordo com as funções de valor de cada descritor e as taxas de substituição associadas aos pontos de vista definidas pelo decisor.

Com isso é possível estabelecer uma classificação por ordem de pontuação recebida por cada solução, cabendo ao operador a decisão sobre qual alternativa de desligamento será efetivamente executada.

XIV) Relatório de Otimização

Essa informação quanto à classificação, bem como o nome dos alimentadores sugeridos para o corte e os valores absolutos obtidos para cada critério, são apresentados para cada solução de primeira ordem obtida ao final do processo, na forma de um relatório de otimização.

3.4 Corte de Carta via Busca Exploratória Exaustiva

Com o objetivo de auxiliar na validação das metodologias de otimização do corte de carga via desligamento de alimentadores, aplicando as ferramentas de inteligência artificial apresentadas nos tópicos antecedentes, foi implementado um algoritmo de busca exploratória exaustiva.

Esse método efetua uma varredura em todo o espaço de busca do problema, identificando todas as soluções pertencentes à fronteira ótima de Pareto. O algoritmo é inicializado pela composição de um conjunto contendo todas as combinações possíveis de desligamento de alimentadores. Após gerar esse conjunto, utilizam-se os mesmos procedimentos desenvolvidos para o PMOGA para calcular os valores absolutos dos critérios para cada indivíduo, ordenamento das soluções e avaliação multicritério para pontuação das soluções. Ao final do processo o relatório de saída apresenta a relação completa das soluções pertencentes à fronteira ótima de Pareto, classificadas de acordo com a pontuação multicritério de cada indivíduo, indicando também os alimentadores sugeridos para o corte e os valores absolutos por critério para cada alternativa.

Com isso, pode ser feita a comparação entre as soluções encontradas pelo processo de busca otimizado, SGA ou PMOGA, e por esse procedimento exaustivo que apresenta a fronteira ótima de Pareto completa para o problema analisado.

É evidente que essa metodologia é altamente ineficiente sob o ponto de vista computacional, exigindo que um número elevado de pontos seja gerado e avaliado, o que torna o processo inviável para realização em um sistema com grande número de alimentadores. Entretanto essa é uma forma bastante prática de se verificar a eficácia dos algoritmos genéticos implementados.

A lógica desse algoritmo de busca exploratória está mostrada na Figura 3.18.

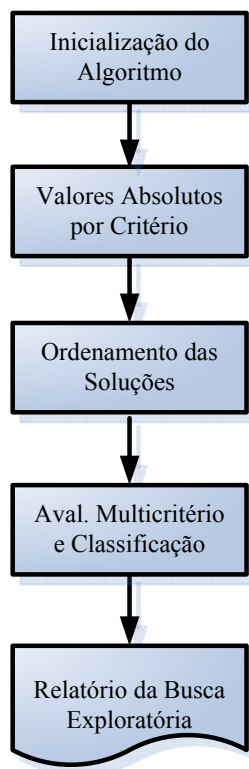


Figura 3.18 - Algoritmo de busca exploratória exaustiva



CAPÍTULO
4

SIMULAÇÕES E
RESULTADOS

***E**ste capítulo apresenta os resultados da simulação de alguns casos de corte de carga, realizadas com o intuito de validar as metodologias de corte de carga e a ferramenta computacional desenvolvidas, bem como avaliar as melhorias proporcionadas através de sua aplicação.*

4.1 Descrição das Etapas de Simulação

O propósito inicial desse capítulo é apresentar alguns estudos de casos que possibilitem a validação das metodologias desenvolvidas para otimização multicritério do problema de corte de carga, contemplando também as evidências do bom funcionamento da ferramenta computacional de apoio à decisão mostrada no capítulo anterior.

Uma vez comprovada a eficácia dessas metodologias, apresenta-se uma análise das melhorias proporcionadas pelo sistema completo de otimização de corte de carga proposto, incluindo o módulo de redução da necessidade de corte por meio da regulação de tensão. Entretanto, para que esses estudos possam ser realizados, é necessário o estabelecimento de sistemas teste, que permitam explorar as características desejadas da metodologia. Assim, inicialmente esse capítulo apresenta as principais características do sistema de distribuição utilizado como base para todas as simulações propostas.

4.2 Sistema de Distribuição Utilizado nos Estudos

As simulações foram realizadas contando com um banco de dados de um sistema real de distribuição, do qual foram extraídos: os valores de carga de cada ponto e os condutores utilizados em cada trecho dos alimentadores; a alocação desses alimentadores nas subestações; os valores de tensão base e as características de regulação de tensão dos transformadores das subestações. Ao total são quatorze alimentadores distribuídos em quatro subestações, estando os dados mencionados acima presentes no Anexo A.

Já as localizações físicas (coordenadas X e Y) das cargas e das subestações foram arbitradas, sem qualquer comprometimento dos resultados para o corte de carga, apenas com o intuito de facilitar a sua visualização na ferramenta gráfica desenvolvida. Também, os valores para os parâmetros de modelagem das cargas e a classificação da carga mais prioritária dos alimentadores são estabelecidos em função do objetivo destacado para cada estudo.

4.3 Validação das Metodologias para Otimização do Corte de Carga

Essa primeira etapa consiste na execução de alguns estudos de corte de carga com o objetivo de verificar a eficácia dos métodos para otimização das ações de desligamento dos alimentadores via AG, relacionados ao Módulo 2 da metodologia proposta. Entende-se que o Módulo 1, que trata do algoritmo desenvolvido para reduzir a necessidade de corte, já foi avaliado nos testes do simulador apresentado no item 3.2.2.

A validação dessas metodologias que utilizam algoritmo genético será efetuada por meio da comparação dos resultados encontrados pelos métodos de otimização via SGA e PMOGA, com as soluções apresentadas pela busca exploratória, que são assumidas como a fronteira ótima de Pareto para cada problema apresentado.

Assim, como o objetivo dessa primeira abordagem é verificar puramente o correto funcionamento das metodologias acima citadas, a qualidade do processo não será analisada sob o aspecto de cada critério indicado pelas soluções encontradas, mas sim pela eficácia de cada metodologia em comparação com os resultados esperados para o problema, determinados pela busca exploratória exaustiva.

Dessa forma, torna-se irrelevante a descrição completa do sistema teste utilizado, contendo os dados de entrada relacionados a cada um dos critérios considerados. Basta para essa análise, uma descrição básica do caso avaliado e a comparação dos resultados obtidos, para as duas metodologias de corte de carga propostas. Da mesma forma, o objetivo principal não é encontrar a configuração dos parâmetros do algoritmo genético que proporcione a melhor eficiência possível para busca, mas sim validar o método como um processo confiável. Portanto não serão discutidas inúmeras alternativas contemplando as várias possibilidades de combinação dos parâmetros de influência do AG, que são: as probabilidades de *crossover* e mutação, tipo de cruzamento, tamanho das populações permanente e do filtro no caso do PMOGA e número de gerações ou tipo de critério de parada no SGA. Os parâmetros utilizados estão baseados na experiência adquirida ao longo de vários testes realizados e também estão de acordo com as boas práticas recomendadas na literatura, em função do porte do problema estudado.

Um estudo importante que está apresentado a seguir é a verificação do comportamento das duas ferramentas de otimização frente a variações nas restrições da função multicritério, que estão ligadas à tolerância para cortes abaixo do solicitado e máxima prioridade permitida para o corte.

Cabe ainda destacar que os tempos de processamento apresentados nos estudos são provenientes de simulações realizadas em um computador com processador *Intel Pentium*[®] *M 1.73 GHz* e com *1 GB* de memória *RAM*.

4.3.1 Primeiro Estudo – Validação da Otimização via PMOGA e SGA

Todos os casos estudados tomam como base o sistema de distribuição comentado em 4.2 e detalhado no Anexo A. Nessa etapa de validação, considera-se que todos os alimentadores estão disponíveis para o corte de carga, o que pode levar à maior complexidade para solução do problema.

As características básicas desse sistema, da maneira como são apresentadas na ferramenta computacional depois de carregado o banco de dados, estão mostradas na Figura 4.1, sendo esses valores (tensões máxima e mínima, perdas e demanda elétricas em cada alimentador) provenientes da execução de um fluxo de potência. Em uma análise breve, pode-se verificar que o alimentador mais carregado é o AL08 que deriva da SE-02, com aproximadamente 3,2 MW de demanda elétrica e que a carga de maior prioridade está conectada no alimentador AL01. O menor nível de tensão é observado no AL13, com 0,94 p.u., que está dentro da faixa considerada adequada para redes de média tensão conforme mostrado na Tabela 2.1. Cabe aqui destacar que a tensão nominal de todos alimentadores é 23 kV. As perdas ativas de todo sistema estão na ordem de 2% do total da demanda ativa.

Nr. De CODs: 1
 Nr. de Conjuntos: 3
 Nr. de SEs: 4

14 Alimentadores Disponíveis para o Corte de Carga

SE	AL	Carga At.[kW]	Perda At.[kW]	Vmin[pu]	Vmax[pu]	Priorid.
SE-01	AL01	1335,61	011,99	0,99	1,00	B5
SE-01	AL02	1861,17	028,18	0,98	1,00	B4
SE-01	AL03	2499,97	030,95	0,97	1,00	A4
SE-01	AL04	1203,22	024,47	0,97	1,00	B1
SE-01	AL05	1252,76	014,86	0,98	1,00	B5
SE-02	AL06	2223,26	047,06	0,96	1,00	A2
SE-02	AL07	1480,48	010,52	0,99	1,00	A1
SE-02	AL08	3112,16	098,49	0,95	1,00	A5
SE-02	AL09	1356,88	049,99	0,95	1,00	A3
SE-03	AL10	1663,73	007,99	0,98	1,00	A1
SE-03	AL11	0495,40	001,09	0,99	1,00	A3
SE-03	AL12	1452,47	008,35	0,98	1,00	A4
SE-04	AL13	2691,50	097,96	0,94	1,00	A1
SE-04	AL14	0650,46	006,68	0,99	1,00	A4

TOTAL: 23279,07 kW 438,58 kW

DEMANDA TOTAL: 23717,65 kW

Figura 4.1 – Características do sistema elétrico para os estudos de validação da otimização

As taxas de substituição consideradas na metodologia de avaliação multicritério, são apresentadas na Figura 4.2, e são arbitradas pelo usuário do programa.

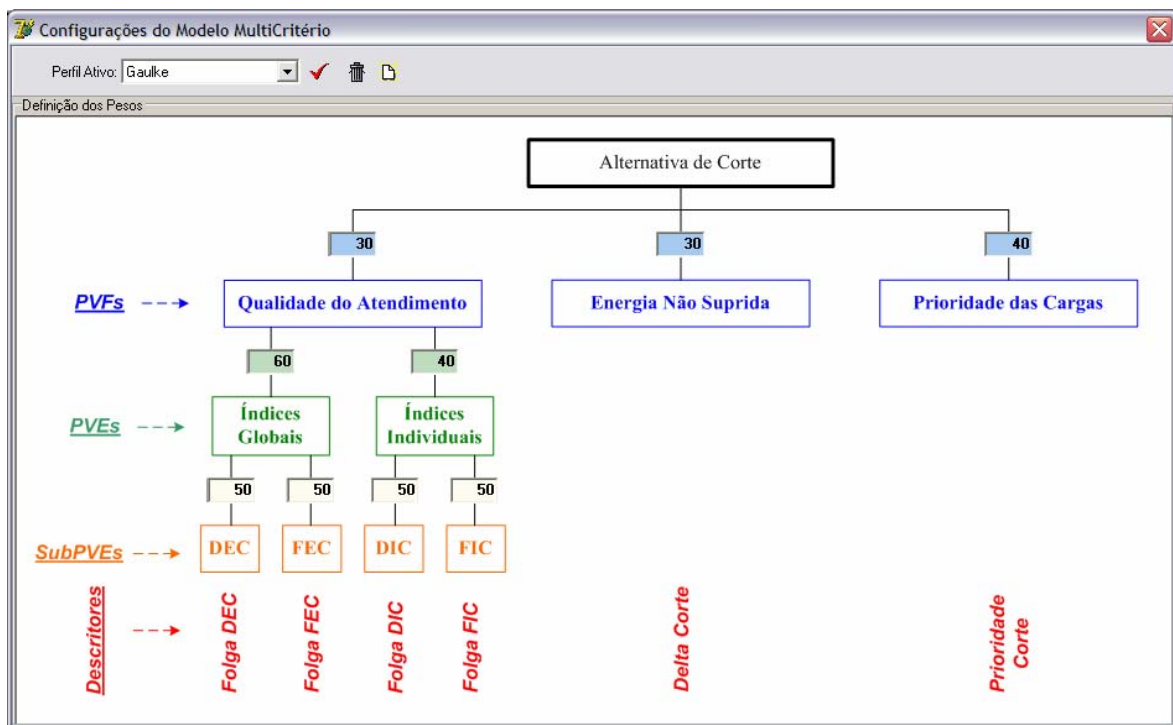


Figura 4.2 – Taxas de substituição utilizadas na validação das metodologias de otimização

Especificamente em relação ao corte de carga simulado, nesse primeiro caso de estudo é solicitado ao programa um **corte de carga** de 5 MW (21,08% da demanda total), com **duração estimada** de 30 minutos, **tolerância** para cortes abaixo de solicitado igual a **zero (0)** e **máxima prioridade** admitida para o corte igual a **C5**. Como o objetivo dessa fase é validar as metodologias de otimização das ações de desligamento (PMOGA e SGA), o módulo para redução da necessidade de corte não será acionado.

Assim, para possibilitar a verificação dos resultados obtidos por cada uma das metodologias de otimização, primeiramente serão expostas as soluções indicadas pela busca exploratória.

4.3.1.1 Resultados da Busca Exploratória

Apresentam-se na Tabela 4.1 as soluções encontradas pelo processo de busca exploratória exaustiva, extraídas do relatório gerado pelo programa, já considerando a classificação das alternativas de corte em função da pontuação recebida na avaliação multicritério.

Tabela 4.1 – Resultados da busca exploratória para o primeiro estudo

===== RESULTADO DA BUSCA EXPLORATÓRIA - Tempo Gasto: 294,359 seg. =====										
Pos.	ALs Desconectados	Pontos	Pr.	DtCorte %	DtCorte kW	FgDEC %	FgFEC %	FgDIC %	FgFIC %	
01°	AL06 AL07 AL09	72,65	A3	003,36	0168,20	23,88	23,39	02,94	26,67	
02°	AL06 AL13	71,31	A2	001,20	0059,79	06,25	-00,80	26,00	22,50	
03°	AL07 AL09 AL10 AL11	70,07	A3	001,32	0066,08	11,77	12,00	02,94	28,00	
04°	AL09 AL10 AL11 AL12	69,87	A4	000,72	0035,89	11,77	12,00	29,00	28,00	
05°	AL06 AL09 AL10	67,78	A3	006,98	0348,92	11,77	12,00	26,00	26,67	
06°	AL06 AL07 AL10	67,45	A2	008,66	0433,06	11,77	12,00	02,94	26,67	
07°	AL07 AL10 AL11 AL12	66,44	A4	002,40	0120,03	11,77	12,00	02,94	30,00	
08°	AL03 AL07 AL09	65,17	A4	008,58	0428,79	24,40	24,68	02,94	16,67	
09°	AL03 AL04 AL09	64,63	B1	003,31	0165,47	24,10	23,94	39,66	10,00	
10°	AL07 AL09 AL12 AL14	64,38	A4	000,32	0015,84	06,25	-00,80	02,94	28,00	
11°	AL03 AL09 AL12	64,37	A4	007,97	0398,60	11,77	12,00	39,66	16,67	
12°	AL06 AL08	62,44	A5	009,62	0480,98	23,88	23,39	25,00	10,00	
13°	AL03 AL04 AL12	59,69	B1	004,39	0219,42	11,77	12,00	45,00	10,00	
14°	AL07 AL10 AL13	58,84	A1	019,04	0952,19	06,25	-00,80	02,94	22,50	
15°	AL03 AL08	58,77	A5	014,83	0741,57	24,25	24,31	25,00	10,00	
16°	AL04 AL10 AL12 AL14	57,19	B1	000,35	0017,37	06,25	-00,80	19,00	10,00	
17°	AL03 AL06 AL09	56,27	A4	024,16	1208,11	23,88	23,39	26,00	16,67	
18°	AL09 AL10 AL13	56,21	A3	017,36	0868,05	06,25	-00,80	26,36	22,50	
19°	AL02 AL08	55,39	B4	002,00	0100,00	24,25	24,31	25,00	10,00	
20°	AL03 AL04 AL05	54,68	B5	000,52	0026,22	23,88	23,39	41,67	10,00	
21°	AL02 AL10 AL12	53,96	B4	000,44	0021,88	11,77	12,00	29,00	26,67	
22°	AL05 AL06 AL07	52,74	B5	000,58	0028,95	23,88	23,39	02,94	26,67	
23°	AL02 AL04 AL09 AL11	52,57	B4	000,41	0020,38	11,77	12,00	30,00	10,00	
24°	AL03 AL05 AL09	52,50	B5	004,11	0205,40	23,88	23,39	39,66	16,67	
25°	AL01 AL06 AL09	50,64	C1	000,50	0024,79	23,50	22,46	26,00	26,67	
26°	AL02 AL09 AL11 AL12	50,58	B4	005,07	0253,51	11,77	12,00	30,00	26,67	
27°	AL02 AL05 AL09 AL11	50,47	B5	001,21	0060,31	11,77	12,00	30,00	26,67	
28°	AL02 AL06 AL09	49,75	B4	011,33	0566,54	23,88	23,39	26,00	26,67	
29°	AL02 AL05 AL06	48,84	B5	008,55	0427,29	23,88	23,39	26,00	26,67	
30°	AL01 AL03 AL05	48,28	C1	002,92	0146,13	23,50	22,46	30,00	16,67	
31°	AL03 AL05 AL12	47,55	B5	005,19	0259,35	11,77	12,00	41,67	16,67	

32°	AL01	AL02	AL05	AL11	47,36	C1	000,02	0001,04	11,77	12,00	30,00	26,67
33°	AL05	AL09	AL10	AL14	47,02	B5	000,07	0003,35	06,25	-00,80	19,00	28,00
34°	AL05	AL10	AL12	AL14	46,39	B5	001,15	0057,30	06,25	-00,80	19,00	30,00
35°	AL02	AL03	AL09		45,53	B4	016,54	0827,13	24,25	24,31	30,00	16,67
36°	AL01	AL07	AL10	AL11	45,14	C1	000,14	0006,81	11,77	12,00	02,94	30,00
37°	AL01	AL05	AL07	AL09	41,36	C1	010,26	0513,09	23,50	22,46	02,94	28,00
38°	AL05	AL07	AL11	AL12	40,75	B5	007,46	0373,07	06,25	-00,80	02,94	36,00
	AL14											
39°	AL01	AL05	AL09	AL12	40,25	C1	009,66	0482,90	11,77	12,00	30,00	28,00
40°	AL01	AL02	AL05	AL09	37,70	C1	018,23	0911,43	23,50	22,46	30,00	26,67
41°	AL01	AL05	AL10	AL12	36,37	C1	014,96	0747,76	11,77	12,00	29,00	30,00

Com essas informações, pode-se verificar que para o caso de corte de carga simulado a fronteira ótima de Pareto é composta por 41 soluções, que estão classificadas de acordo com a pontuação recebida na metodologia de avaliação multicritério.

Na seqüência serão apresentados os resultados obtidos pelas duas metodologias de otimização (PMOGA e SGA).

4.3.1.2 Resultados da Otimização via PMOGA

Parâmetros considerados para a configuração do AG:

- Probabilidade de *Crossover*: 95 %
- Probabilidade de Mutação: 2 %
- Tamanho da População: 100
- Tamanho do Filtro: 50
- Número de Gerações Padrão: 50
- Número de Gerações Adicionais: 100
- Opção de *Crossover*: Dois Pontos

Considerações com respeito às restrições da função multicritério:

- Tolerância para Cortes Inferiores ao solicitado: 0 %
- Prioridade Limite: C5

Com essas configurações, as soluções apontadas por essa metodologia de otimização das ações de desligamento dos alimentadores são mostradas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Resultados da otimização via PMOGA para o primeiro estudo

===== RESULTADO DA OTIMIZAÇÃO MULTICRITÉRIO VIA PMOGA - Tempo Gasto: 1,515 seg. =====											
Pos.	ALs Desconectados	Pontos	Pr.	DtCorte %	DtCorte kW	FgDEC %	FgFEC %	FgDIC %	FgFIC %		
01°	AL06 AL07 AL09	72,65	A3	003,36	0168,20	23,88	23,39	02,94	26,67		
02°	AL06 AL13	71,31	A2	001,20	0059,79	06,25	-00,80	26,00	22,50		
03°	AL09 AL10 AL11 AL12	69,87	A4	000,72	0035,89	11,77	12,00	29,00	28,00		
04°	AL06 AL09 AL10	67,78	A3	006,98	0348,92	11,77	12,00	26,00	26,67		
05°	AL03 AL07 AL09	65,17	A4	008,58	0428,79	24,40	24,68	02,94	16,67		
06°	AL03 AL04 AL09	64,63	B1	003,31	0165,47	24,10	23,94	39,66	10,00		
07°	AL07 AL09 AL12 AL14	64,38	A4	000,32	0015,84	06,25	-00,80	02,94	28,00		
08°	AL03 AL09 AL12	64,37	A4	007,97	0398,60	11,77	12,00	39,66	16,67		
09°	AL07 AL10 AL12 AL14	60,59	A4	005,61	0280,69	06,25	-00,80	02,94	30,00		
10°	AL03 AL04 AL12	59,69	B1	004,39	0219,42	11,77	12,00	45,00	10,00		
11°	AL07 AL10 AL13	58,84	A1	019,04	0952,19	06,25	-00,80	02,94	22,50		
12°	AL03 AL08	58,77	A5	014,83	0741,57	24,25	24,31	25,00	10,00		
13°	AL04 AL10 AL12 AL14	57,19	B1	000,35	0017,37	06,25	-00,80	19,00	10,00		
14°	AL03 AL06 AL09	56,27	A4	024,16	1208,11	23,88	23,39	26,00	16,67		
15°	AL09 AL10 AL13	56,21	A3	017,36	0868,05	06,25	-00,80	26,36	22,50		
16°	AL02 AL08	55,39	B4	002,00	0100,00	24,25	24,31	25,00	10,00		
17°	AL02 AL10 AL12	53,96	B4	000,44	0021,88	11,77	12,00	29,00	26,67		
18°	AL03 AL05 AL09	52,50	B5	004,11	0205,40	23,88	23,39	39,66	16,67		
19°	AL01 AL06 AL09	50,64	C1	000,50	0024,79	23,50	22,46	26,00	26,67		
20°	AL02 AL05 AL09 AL11	50,47	B5	001,21	0060,31	11,77	12,00	30,00	26,67		
21°	AL02 AL06 AL09	49,75	B4	011,33	0566,54	23,88	23,39	26,00	26,67		
22°	AL02 AL05 AL06	48,84	B5	008,55	0427,29	23,88	23,39	26,00	26,67		
23°	AL01 AL03 AL05	48,28	C1	002,92	0146,13	23,50	22,46	30,00	16,67		
24°	AL01 AL03 AL04	48,28	C1	002,12	0106,20	23,50	22,46	30,00	10,00		
25°	AL03 AL05 AL12	47,55	B5	005,19	0259,35	11,77	12,00	41,67	16,67		
26°	AL01 AL02 AL05 AL11	47,36	C1	000,02	0001,04	11,77	12,00	30,00	26,67		
27°	AL05 AL09 AL10 AL14	47,02	B5	000,07	0003,35	06,25	-00,80	19,00	28,00		
28°	AL05 AL10 AL12 AL14	46,39	B5	001,15	0057,30	06,25	-00,80	19,00	30,00		
29°	AL02 AL03 AL09	45,53	B4	016,54	0827,13	24,25	24,31	30,00	16,67		
30°	AL01 AL07 AL10 AL11	45,14	C1	000,14	0006,81	11,77	12,00	02,94	30,00		
31°	AL01 AL05 AL07 AL09	41,36	C1	010,26	0513,09	23,50	22,46	02,94	28,00		
32°	AL01 AL05 AL09 AL12	40,25	C1	009,66	0482,90	11,77	12,00	30,00	28,00		
33°	AL01 AL02 AL05 AL09	37,70	C1	018,23	0911,43	23,50	22,46	30,00	26,67		
34°	AL01 AL05 AL10 AL12	36,37	C1	014,96	0747,76	11,77	12,00	29,00	30,00		
35°	AL05 AL07 AL10 AL12	35,88	B5	017,82	0891,17	11,77	12,00	02,94	30,00		

A primeira constatação que pode ser feita está relacionada ao tempo gasto pela metodologia PMOGA (1,515 segundos), muito inferior à duração do processo de busca exploratório das soluções (294,359 segundos).

Quanto à eficácia do método otimizado PMOGA, as figuras a seguir podem auxiliar na investigação do processo evolutivo.

Pela Figura 4.3 é possível verificar que a partir da geração número 20, a solução melhor colocada na pontuação multicritério já estava presente no conjunto das soluções retidas no filtro.

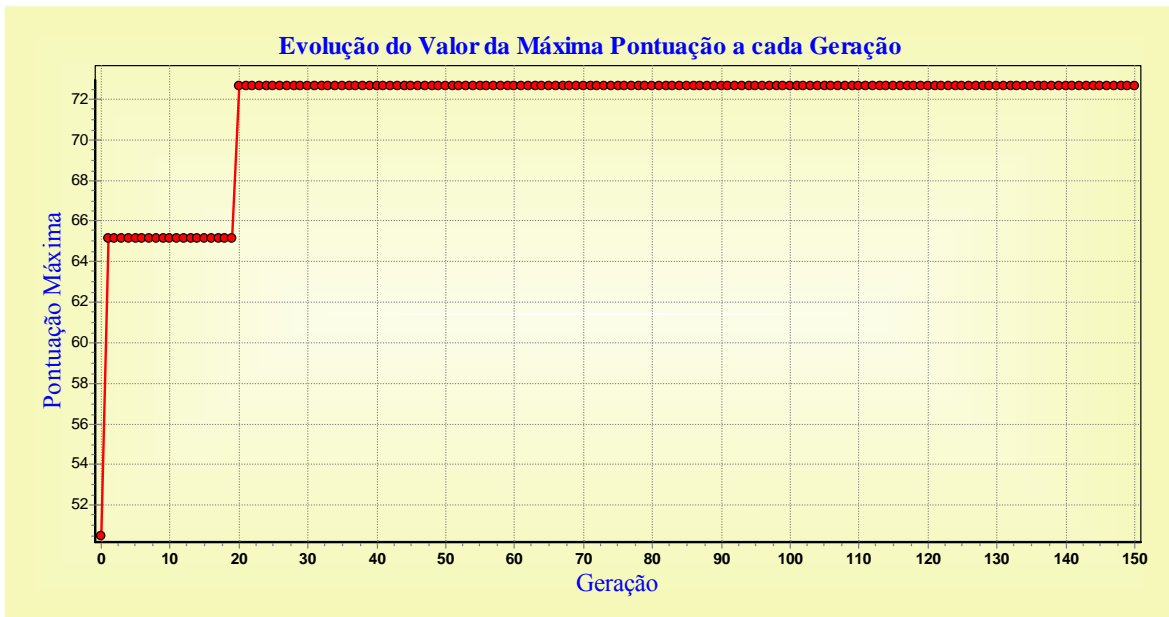


Figura 4.3 – Valor da máxima pontuação a cada geração (PMOGA - primeiro estudo)

Entretanto, conforme comprovado na Figura 4.4, as demais gerações foram importantes para diversificar as soluções do filtro e aumentar o número de soluções nele retidas que pertencem à fronteira ótima de Pareto, ou seja, que são verdadeiramente soluções de primeira ordem para o problema em questão.

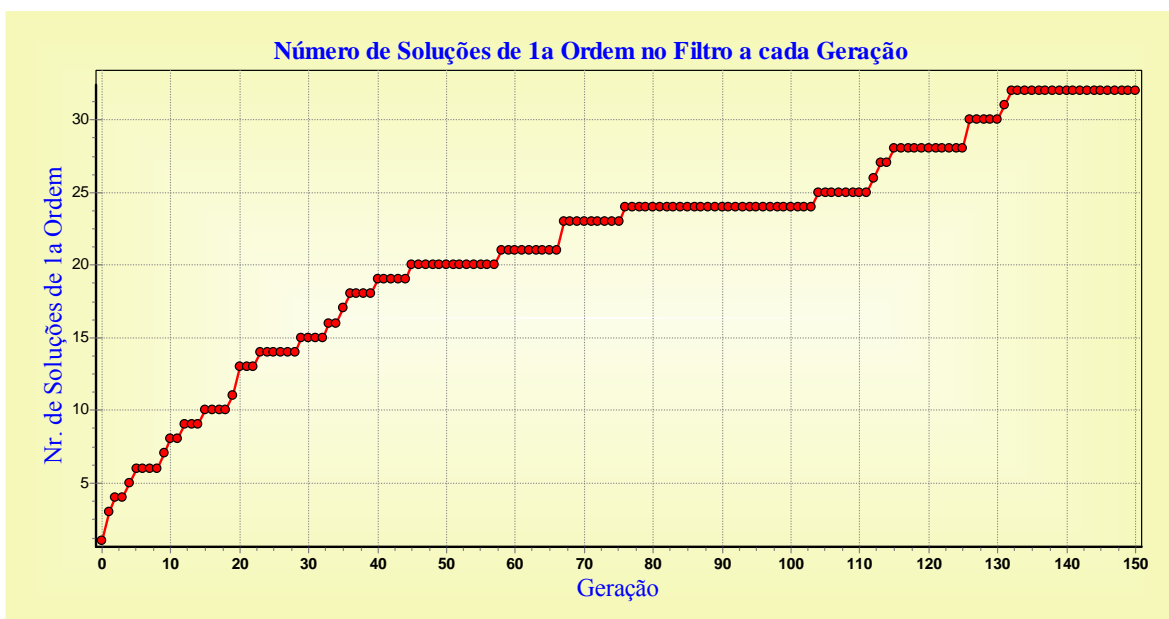


Figura 4.4 – Número de soluções de 1ª ordem a cada geração (PMOGA - primeiro estudo)

Comparando-se as soluções apresentadas na Tabela 4.2, com aquelas indicadas pela busca exploratória, (Tabela 4.1), é possível observar que das 35 alternativas de corte encontradas pelo PMOGA, 32 são soluções não-dominadas (1ª ordem) considerando todo o espaço de busca do problema simulado. As 3 soluções apresentadas pelo PMOGA que não são verdadeiramente soluções de ordem 1 para o problema estão destacadas por meio de um sombreado na Tabela 4.2.

Assim, de um total de 41 soluções de primeira ordem existentes para esse estudo de corte de carga em particular, a otimização via PMOGA encontrou 32 delas (78%), em um tempo 194,3 vezes menor. Além disso, as primeiras 8 soluções apresentadas pelo PMOGA são todas pertencentes à fronteira ótima de Pareto, garantindo ao usuário uma boa flexibilidade de escolha entre soluções de primeira ordem. Dessa forma entende-se que o processo otimizado via PMOGA apresentou um excelente resultado com esforço computacional reduzido.

4.3.1.3 Resultados da Otimização via SGA

Diferentemente do caso anterior, a metodologia de otimização via SGA apresenta como resultado uma única solução, que representa a melhor alternativa de corte de carga encontrada pelo algoritmo genético, considerando como aptidão a pontuação recebida na avaliação multicritério.

Entretanto, para comparar o desempenho do SGA com os resultados da fronteira ótima de Pareto, segundo as indicações da busca exploratória, foram realizadas vinte simulações seqüenciais com os mesmos parâmetros do AG, verificando-se os resultados encontrados. Dessa forma fica mais explícito o comportamento do algoritmo genético, sem que as variações sejam atribuídas a modificações de parâmetros.

Quanto a esses parâmetros do AG, procurou-se seguir as mesmas configurações utilizadas no PMOGA, conforme mostrado na seqüência. Entretanto o critério de parada utilizado foi o número de repetições da máxima aptidão, uma vez que em testes realizados esse critério se mostrou bastante eficiente e menos dispendioso em demanda computacional.

- Probabilidade de *Crossover*: 95 %
- Probabilidade de Mutação: 2 %
- Tamanho da População: 100
- Critério de Parada: Convergência da aptidão (10 repetições)
- Opção de *Crossover*: Dois Pontos
- Critério de Substituição da Pop.: Substituir apenas os menos aptos

Considerações com respeito às restrições da função multicritério:

- Tolerância para Cortes Inferiores ao solicitado: 0 %
- Prioridade Limite: C5

Na Tabela 4.3 abaixo são apresentadas as soluções de corte encontradas nas vinte simulações realizadas, indicando para cada uma delas: o número de vezes que essa solução se repetiu no total de simulações do SGA; a posição correspondente de cada solução na tabela das soluções de Pareto (Tabela 4.1) - quando a solução for de primeira ordem; a pontuação multicritério de cada alternativa; a média dos número de gerações necessárias para a convergência do processo; o tempo médio gasto no processo de otimização, considerando-se todas as vezes que a mesma solução foi encontrada.

Tabela 4.3 – Resultados da otimização via SGA para o primeiro estudo

Alternativa de Corte ALs Desconectados	Nr. Repet.	Posição Busca Exp.	Pontos	Nr. de Gerações Média	Tempo Médio [seg.]
AL06 AL07 AL09	9	1°	72,65	14,3	0,344
AL06 AL13	3	2°	71,31	10,3	0,308
AL07 AL09 AL10 AL11	2	3°	70,07	10,5	0,302
AL09 AL10 AL11 AL12	2	4°	69,87	9,3	0,268
AL07 AL10 AL11 AL12	2	7°	66,44	12	0,322
AL03 AL04 AL09	1	9°	64,63	11	0,312
AL07 AL09 AL12 AL14	1	10°	64,38	8	0,248

Com esses resultados, pode-se verificar que o SGA também apresenta um desempenho bastante eficaz, com todas as soluções posicionadas entre as 10 mais bem

classificadas da busca exploratória, portanto todas de primeira ordem. Além disso, a alternativa de corte mais bem pontuada se repetiu 9 vezes em um total de 20 simulações, logo, em 45% dos casos.

Também, o tempo gasto em cada simulação foi bem inferior ao exigido na busca exploratória, principalmente em função do reduzido número de gerações que foram observadas para a convergência da aptidão em cada simulação. Comparando o tempo de cada simulação do SGA com o PMOGA, em primeira instância pode-se imaginar que o SGA é mais rápido, entretanto esse algoritmo genético apresenta apenas uma solução por vez, enquanto o PMOGA resulta em um amplo conjunto de soluções.

Assim, se a otimização via SGA fosse repetida 35 vezes, para se igualar ao número de soluções apresentadas pelo PMOGA para o estudo em questão (conforme Tabela 4.2), certamente o tempo total gasto nessa simulação seria superior aos 1,515 segundos dispendidos pelo PMOGA. Logo, se o objetivo for a obtenção de um conjunto de soluções não-dominadas para que o usuário opte entre uma delas, a otimização via PMOGA é mais interessante do ponto de vista computacional. Já se o interesse for por uma única solução, o SGA é o mais indicado.

4.3.2 Segundo Estudo - Validação da Otimização via PMOGA e SGA

Esse segundo caso de estudo utiliza a mesma base de dados do estudo anterior, com as características do sistema mostradas na Figura 4.1, e as taxas de substituição conforme a Figura 4.2. A diferença está no caso de corte de carga simulado, uma vez que nesse segundo estudo serão modificadas as restrições impostas à otimização multicritério. Assim, o corte simulado no segundo estudo também envolve a solicitação de um **corte de carga** de 5 MW (21,08% da demanda total), com **duração estimada** de **30 minutos**, entretanto com **tolerância** para cortes abaixo do solicitado igual a **5%** e **máxima prioridade** admitida para o corte igual a **A4**. Novamente, como o objetivo é validar as metodologias de otimização PMOGA e SGA, o módulo para redução da necessidade de corte não será acionado.

4.3.2.1 Resultados da Busca Exploratória

As soluções encontradas pelo processo de busca exploratória exaustiva são apresentadas abaixo.

Tabela 4.4 – Resultados da busca exploratória para o segundo estudo

===== RESULTADO DA BUSCA EXPLORATÓRIA - Tempo Gasto: 256,610 seg. =====										
Pos.	ALs Desconectados	Pontos	Pr.	DtCorte %	DtCorte kW	FgDEC %	FgFEC %	FgDIC %	FgFIC %	
01°	AL06 AL07 AL09	72,65	A3	003,36	0168,20	23,88	23,39	02,94	26,67	
02°	AL06 AL13	71,31	A2	001,20	0059,79	06,25	-00,80	26,00	22,50	
03°	AL03 AL06	70,37	A4	-003,98	-0198,76	23,88	23,39	26,00	16,67	
04°	AL07 AL09 AL10 AL11	70,07	A3	001,32	0066,08	11,77	12,00	02,94	28,00	
05°	AL09 AL10 AL11 AL12	69,87	A4	000,72	0035,89	11,77	12,00	29,00	28,00	
06°	AL10 AL11 AL13	68,60	A3	-000,85	-0042,33	06,25	-00,80	26,36	22,50	
07°	AL06 AL09 AL10	67,78	A3	006,98	0348,92	11,77	12,00	26,00	26,67	
08°	AL06 AL07 AL10	67,45	A2	008,66	0433,06	11,77	12,00	02,94	26,67	
09°	AL07 AL10 AL11 AL12	66,44	A4	002,40	0120,03	11,77	12,00	02,94	30,00	
10°	AL03 AL07 AL09	65,17	A4	008,58	0428,79	24,40	24,68	02,94	16,67	
11°	AL07 AL09 AL12 AL14	64,38	A4	000,32	0015,84	06,25	-00,80	02,94	28,00	
12°	AL03 AL09 AL12	64,37	A4	007,97	0398,60	11,77	12,00	39,66	16,67	
13°	AL07 AL10 AL13	58,84	A1	019,04	0952,19	06,25	-00,80	02,94	22,50	

Pode-se verificar que com a modificação das restrições do problema, o número de soluções da fronteira ótima de Pareto foi reduzida para 13. Isso ocorreu principalmente devido à restrição quanto à máxima prioridade de carga admitida para o corte (A4), permitindo que apenas um número menor de alimentadores seja passível de corte. Quanto à relaxação do critério de tolerância para cortes inferiores ao solicitado (5%), pode-se observar que algumas soluções apresentam um delta corte negativo (quando o corte sugerido pela solução é menor do que o corte solicitado), tornando-se atrativas para o problema. Nota-se também, que as duas soluções mais bem classificadas de acordo com avaliação multicritério continuam sendo as mesmas observadas anteriormente.

4.3.2.2 Resultados da Otimização via PMOGA

Parâmetros considerados para a configuração do AG:

- Probabilidade de *Crossover*: 95 %
- Probabilidade de *Mutação*: 2 %
- Tamanho da População: 100
- Tamanho do Filtro: 50
- Número de Gerações Padrão: 50
- Número de Gerações Adicionais: 100

- Opção de *Crossover*: Dois Pontos

Considerações com respeito às restrições da função multicritério:

- Tolerância para Cortes Inferiores ao solicitado: 5 %
- Prioridade Limite: A4

As soluções encontradas por essa metodologia de otimização são apresentadas na tabela abaixo.

Tabela 4.5 – Resultados da otimização via PMOGA para o segundo estudo

===== RESULTADO DA OTIMIZAÇÃO MULTICRITÉRIO VIA PMOGA - Tempo Gasto: 1,110 seg. =====										
Pos.	ALs Desconectados	Pontos	Pr.	DtCorte %	DtCorte kW	FgDEC %	FgFEC %	FgDIC %	FgFIC %	
01º	AL06 AL07 AL09	72,65	A3	003,36	0168,20	23,88	23,39	02,94	26,67	
02º	AL06 AL13	71,31	A2	001,20	0059,79	06,25	-00,80	26,00	22,50	
03º	AL03 AL06	70,37	A4	-003,98	-0198,76	23,88	23,39	26,00	16,67	
04º	AL07 AL09 AL10 AL11	70,07	A3	001,32	0066,08	11,77	12,00	02,94	28,00	
05º	AL09 AL10 AL11 AL12	69,87	A4	000,72	0035,89	11,77	12,00	29,00	28,00	
06º	AL10 AL11 AL13	68,60	A3	-000,85	-0042,33	06,25	-00,80	26,36	22,50	
07º	AL06 AL09 AL10	67,78	A3	006,98	0348,92	11,77	12,00	26,00	26,67	
08º	AL06 AL07 AL10	67,45	A2	008,66	0433,06	11,77	12,00	02,94	26,67	
09º	AL07 AL10 AL11 AL12	66,44	A4	002,40	0120,03	11,77	12,00	02,94	30,00	
10º	AL03 AL07 AL09	65,17	A4	008,58	0428,79	24,40	24,68	02,94	16,67	
11º	AL07 AL09 AL12 AL14	64,38	A4	000,32	0015,84	06,25	-00,80	02,94	28,00	
12º	AL03 AL09 AL12	64,37	A4	007,97	0398,60	11,77	12,00	39,66	16,67	
13º	AL07 AL10 AL13	58,84	A1	019,04	0952,19	06,25	-00,80	02,94	22,50	

Com esses resultados, pode-se constatar que a metodologia de otimização PMOGA encontrou todas as soluções da fronteira ótima de Pareto, em um tempo bem inferior ao processo de busca exploratória (1,110 segundos versus 256,610 segundos). Também percebe-se que as restrições estão sendo respeitadas, uma vez que a maior prioridade de carga desconectada é classificada como A4 e a tolerância para cortes inferiores ao solicitado está dentro do limite de 5%. Assim, mesmo com um problema mais complexo em termos das restrições impostas à função multicritério, a metodologia de otimização implementada mostrou-se muito eficiente.

Em termos da evolução do algoritmo, as figuras a seguir mostram o comportamento das soluções ao longo das gerações, destacando-se que nas gerações adicionais (50ª à 150ª geração) foram inseridas 5 das 13 soluções de primeira ordem do filtro.

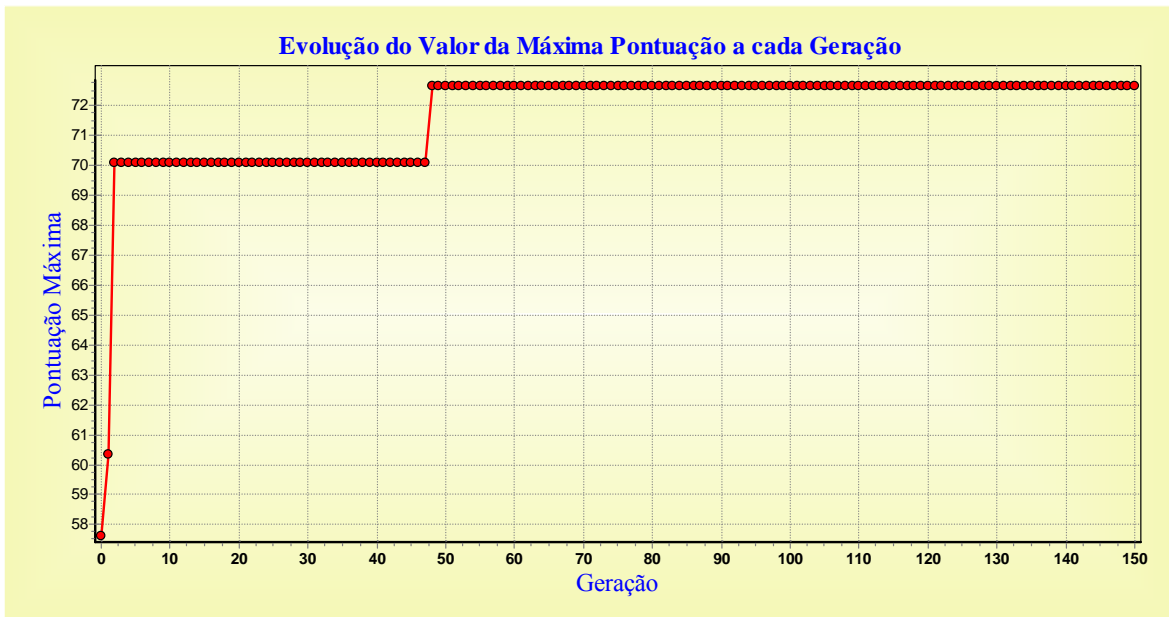


Figura 4.5 – Valor da máxima pontuação a cada geração (PMOGA - segundo estudo)

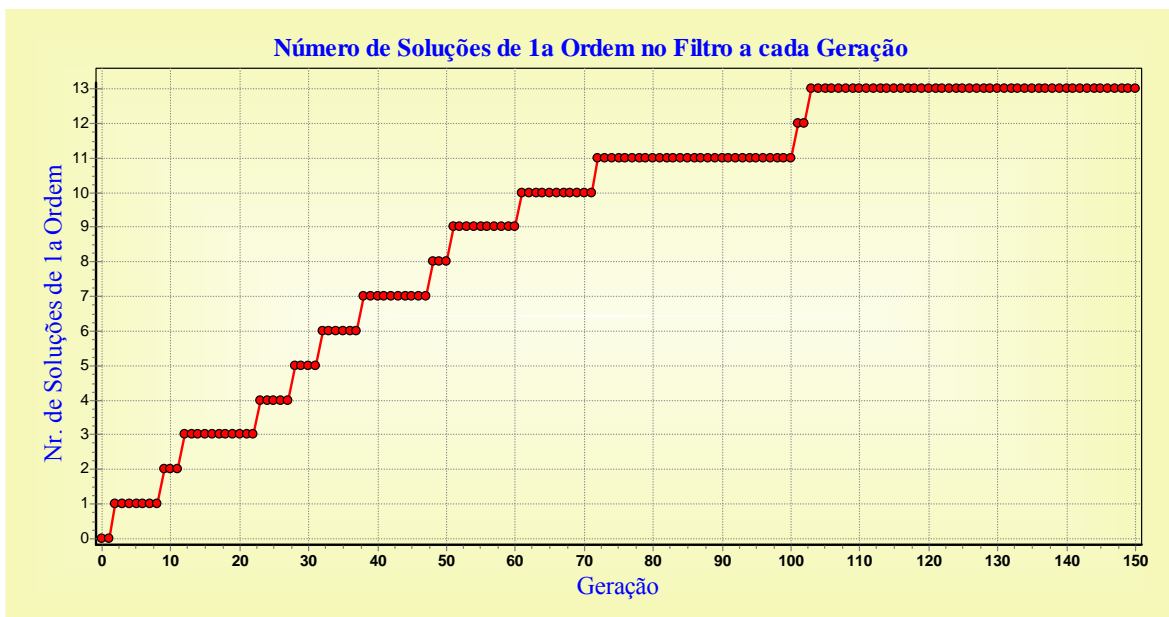


Figura 4.6 – Número de soluções de 1ª ordem a cada geração (PMOGA - segundo estudo)

4.3.2.3 Resultados da Otimização via SGA

Para esse segundo caso estudado, o mesmo procedimento já descrito para a otimização via SGA do primeiro estudo foi repetido, incluindo os parâmetros utilizados para o AG. Assim, das vinte simulações realizadas, a Tabela 4.6 condensa os aspectos importantes dos resultados encontrados. Cabe lembrar que nesse caso a comparação é feita com as soluções da busca exploratória, mostradas na Tabela 4.4.

Tabela 4.6 – Resultados da otimização via SGA para o segundo estudo

<i>Alternativa de Corte</i> ALs Desconectados	Nr. Repet.	Posição Busca Exp.	Pontos	Geração Média	Tempo Médio [seg.]
AL06 AL07 AL09	12	1°	72,65	13,6	0,332
AL06 AL13	3	2°	71,31	11,2	0,318
AL03 AL06	3	3°	70,37	10,6	0,309
AL07 AL09 AL10 AL11	1	4°	70,07	11	0,313
AL10 AL11 AL13	1	6°	68,60	11	0,311

Assim, com esses resultados para o segundo caso estudado, que contempla um problema com diferente configuração das restrições impostas à função multicritério, o algoritmo de otimização via SGA confirmou sua eficácia para o problema simulado. Todas as soluções encontradas são pertencentes à fronteira ótima de Pareto e a solução com a melhor pontuação segundo a avaliação multicritério foi encontrada em 12 das 20 simulação, ou seja, em 60 % das respostas.

Novamente como era esperado, o tempo gasto em cada simulação foi bastante inferior àquele dispendido na busca exploratória, mesmo se considerando que o número de soluções apresentadas nesse processo exaustivo é treze vezes maior.

Quanto aos gráficos gerados em cada simulação, a Figura 4.7 mostra um exemplo da evolução das pontuações ao longo das gerações. Pode-se verificar que já a partir da terceira geração, o indivíduo com a melhor pontuação está presente na população e como são substituídos apenas os piores indivíduos, esse elitismo garante que as pontuações máxima e média nunca recuem.

Em termos da pontuação média da população, fica claro pelo gráfico da Tabela 4.7, que na população inicial (geração zero) há elementos com aptidões muito negativas ($-\infty$), caracterizadas por se tratar de alternativas de corte que infringem alguma das restrições do problema. Dessa forma, a pontuação média da população recebe um valor muito negativo e não aparece na escala do gráfico. Já a partir da sexta geração, a pontuação média da população se iguala a pontuação do melhor indivíduo, o que significa que todos indivíduos convergiram para o mesmo cromossomo.

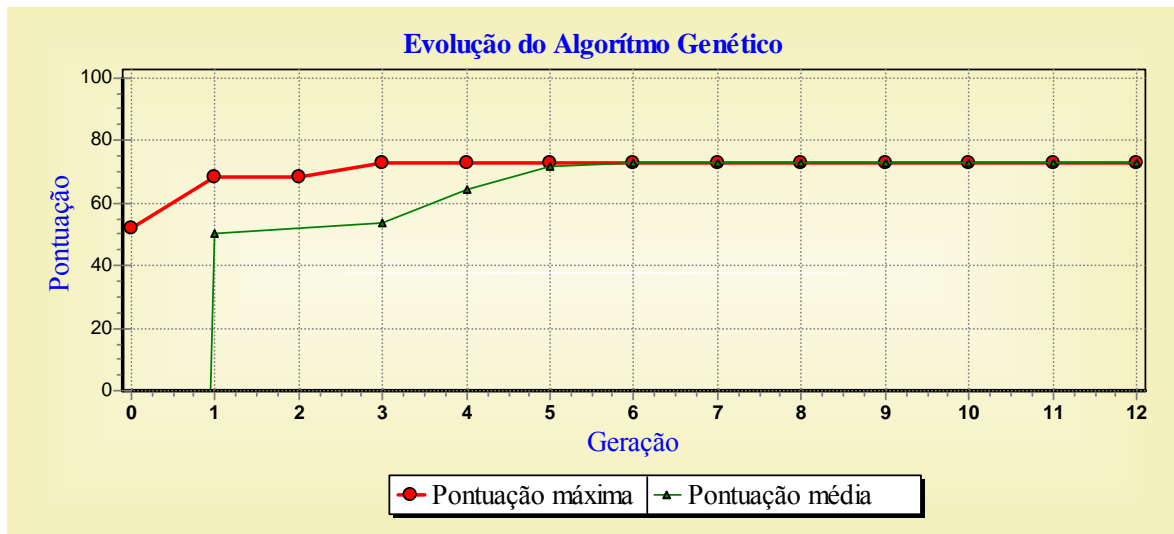


Figura 4.7 – Valor da pontuação máxima e média a cada geração (SGA – segundo estudo)

4.4 Análise das Contribuições da Metodologia Proposta

Por meio das simulações apresentadas nos itens anteriores, considera-se que as metodologias desenvolvidas para otimizar as ações de corte de carga estão validadas e portanto apresentam soluções eficazes para o problema.

Nessa segunda etapa das simulações, pretende-se apresentar casos de estudo que tornam evidentes algumas contribuições que a metodologia desenvolvida propicia na solução do corte de carga.

4.4.1 Terceiro Estudo - Redução da Necessidade de Corte

O terceiro caso apresentado trata de um estudo que mostra os ganhos conseguidos com a inserção do módulo de regulação de tensão (Módulo 1) no processo de corte de carga. O estudo simulado considera uma **solicitação de corte** de carga de **7 MW**, com uma **duração estimada de 40 minutos**, **tolerância de 0%** para cortes inferiores ao desejado e **maior prioridade** de carga permitida para o corte igual a **C5**. Lembrando que de acordo com a codificação adotada no trabalho, conforme item 3.3.2.1, C5 é o maior nível de prioridade de carga.

O sistema teste se baseia no mesmo sistema de distribuição descrito no Anexo A, com todos os alimentadores disponíveis para o corte de carga. As características básicas desse sistema são mostradas na Figura 4.8, conforme informações disponibilizadas pela ferramenta computacional. Já as taxas de substituição adotadas na avaliação multicritério são as mesmas dos estudos anteriores, conforme a Figura 4.2.

Nr. de CODs:	1					
Nr. de Conjuntos:	3					
Nr. de SEs:	4					
14 Alimentadores Disponíveis para o Corte de Carga						
SE	AL	Carga At.[kW]	Perda At.[kW]	Vmin[pu]	Vmax[pu]	Priorid.
SE-01	AL01	1326,77	011,83	0,99	1,00	B4
SE-01	AL02	1894,22	029,16	0,98	1,00	B4
SE-01	AL03	2611,94	033,75	0,97	1,00	B4
SE-01	AL04	1190,33	023,92	0,97	1,00	A4
SE-01	AL05	1113,32	011,70	0,98	1,00	A3
SE-02	AL06	2446,14	057,23	0,96	1,00	A4
SE-02	AL07	1541,93	011,43	0,99	1,00	A3
SE-02	AL08	2067,47	041,84	0,97	1,00	B4
SE-02	AL09	0895,19	021,18	0,97	1,00	A3
SE-03	AL10	2728,73	021,82	0,97	1,00	B1
SE-03	AL11	0502,21	001,12	0,99	1,00	A2
SE-03	AL12	1340,47	007,10	0,99	1,00	A4
SE-04	AL13	1642,11	034,86	0,96	1,00	B3
SE-04	AL14	0806,32	010,33	0,98	1,00	A1
		TOTAL: 22107,15 kW	317,26 kW			
DEMANDA TOTAL:		22424,42 kW				

Figura 4.8 – Características do sistema elétrico para o terceiro estudo

Outras duas características importantes a serem destacadas para esse estudo são a modelagem adotada para as cargas e o fator de demanda. Assim, os percentuais de potência constante (k1), corrente constante (k2) e impedância constante (k3) e o fator de demanda considerados para todas as cargas de cada alimentador são adotados conforma a Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Constantes para a modelagem da carga e fator de demanda para o terceiro estudo

Alimentador	k1	k2	k3	FD
AL01	0,40	0,00	0,60	0,6
AL02	0,20	0,40	0,40	0,7
AL03	0,50	0,20	0,30	0,6
AL04	0,60	0,00	0,40	0,7
AL05	0,20	0,30	0,50	0,5

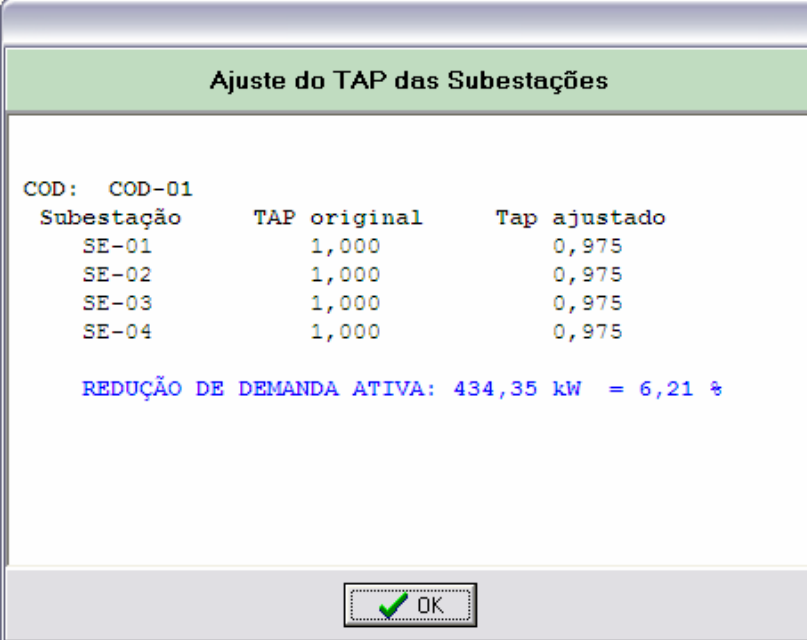
AL06	0,65	0,10	0,25	0,8
AL07	0,50	0,20	0,30	0,7
AL08	0,10	0,20	0,70	0,4
AL09	0,30	0,30	0,40	0,5
AL10	0,50	0,20	0,30	0,8
AL11	0,40	0,30	0,30	0,6
AL12	0,40	0,20	0,40	0,6
AL13	0,80	0,00	0,20	0,4
AL14	0,35	0,05	0,60	0,8

Para permitir uma comparação que mostre os benefícios da inserção do Módulo 1 na otimização do corte de carga, primeiramente apresenta-se a melhor solução encontrada pelo algoritmo de otimização das ações de desligamento dos alimentadores, sem considerar a atuação desse módulo, ou seja, sem marcar a opção “Ajustar TAP das SE’s” na tela de abertura da ferramenta computacional. Cabe destacar que essa melhor solução foi encontrada tanto pela otimização via SGA quanto pelo PMOGA, utilizando as mesmas configurações das simulações para validação dessas metodologias.

- Corte Sugerido: **AL04 AL05 AL06 AL07 AL09**
- Demanda Total Desconectada: **7312,375 kW**
- Pontuação Multicritério: 68,95
- Delta Corte: 4,4625% = 312,375kW
- Maior Prioridade Desconectada: A4
- Folga DEC: 23,50%
- Folga FEC: 41,41%
- Folga DIC: 1,96%
- Folga FIC: 10,00%

É importante ressaltar que a demanda total desconectada é o montante de potência ativa que deixa de ser consumida com o corte sugerido, incluindo as perdas ativas.

Na seqüência, o mesmo estudo de corte de carga foi repetido, entretanto considerando-se agora a atuação do módulo para redução da necessidade de corte. Com esse módulo acionado, o programa executa o algoritmo para determinar o menor TAP de cada subestação, sem infringir o limite mínimo para a tensão em qualquer ponto de carga, que nesse estudo foi definido em 0,93 p.u. A Figura 4.9, mostra o ajuste proposto pelo algoritmo, incluindo a redução de demanda ativa conseguida com a regulação de tensão.



Ajuste do TAP das Subestações		
COD:	COD-01	
Subestação	TAP original	Tap ajustado
SE-01	1,000	0,975
SE-02	1,000	0,975
SE-03	1,000	0,975
SE-04	1,000	0,975
REDUÇÃO DE DEMANDA ATIVA: 434,35 kW = 6,21 %		

Figura 4.9 – Ajuste proposto pelo Módulo 1 para o terceiro estudo

Vale lembrar que o valor mínimo para o TAP de cada subestação está ligado à menor regulação de tensão disponível no transformador de saída, assim como o passo para decrementar esse valor depende do comutador de TAP sob carga instalado nesse transformador. Para fins de estudos práticos, nas avaliações apresentadas nesse trabalho, utilizaram-se valores reais de algumas subestações, sendo que para todos os casos a variação mínima de tensão é de 5% em relação a nominal, com um estágio intermediário, ou seja, passo de 2,5%.

Assim, apenas com essas operações de regulação de tensão, 6,21% do corte de carga solicitado já foi cumprido, restando 6565,65 kW para completar a solicitação. Para

tanto, o módulo para otimização das ações de desligamento de alimentadores é acionado, sendo que a solução ótima verificada pelos métodos via SGA e PMOGA está mostrada abaixo:

- Corte Sugerido: **AL04 AL05 AL06 AL11 AL12**
- Demanda Total Desconectada: **6574,607 kW**
- Pontuação Multicritério: 68,144
- Delta Corte: 0,1364% = 8,957 kW
- Maior Prioridade Desconectada: A4
- Folga DEC: 10,588%
- Folga FEC: 12,000%
- Folga DIC: 25,333%
- Folga FIC: 10,000%

Assim, comparando-se os dois resultados da otimização (primeiramente sem acionar o Módulo 1 e na última simulação com o uso desse módulo), pode-se verificar que os alimentadores sugeridos para o corte não são os mesmos. O mais importante a ser destacado é a redução na demanda total desconectada conseguida no caso em que o módulo de regulação de tensão foi utilizado. Calculando-se a diferença entre os dois montantes de demanda total desconectada (7312,375 kW sem utilizar o Módulo 1 e 6574,607 kW quando o Módulo 1 integra o algoritmo de determinação do corte de carga), são aproximadamente 738 kW de demanda que não precisaram ser desconectados do sistema, incluindo aí a parcela de potência efetivamente consumida pelos consumidores e as perdas do sistema.

Para dar uma melhor noção em termos de ganhos para a concessionária com a diminuição da ENS nas ações de corte de carga, pode-se calcular apenas o carregamento ativo desconectado em cada caso, excluindo-se a parcela das perdas. Assim, para o primeiro caso, onde não se opta pela regulação de tensão, as cargas ativas desconectadas somam 7186,91 kW (7312,375 kW menos as perdas ativas), enquanto que, incluindo-se o Módulo 1, o corte sugerido é de 6471,39 kW (6574,607 kW menos as perdas ativas) de

cargas ativas. Dessa forma, percebe-se uma redução de 715,52 kW no desligamento de consumidores, que pode representar um benefício para a concessionária uma vez que essa demanda de energia não será desligada do sistema, minimizando portanto as sua perda de faturamento durante o corte de carga.

É importante perceber que essa redução de potência desconectada, que incide diretamente na energia não faturada, corresponde a 3,27% de toda potência consumida pelos consumidores no sistema original (antes da regulação de tensão). Portanto, dependendo da ordem de grandeza do sistema, esse benefício pode representar grandes montantes financeiros ao longo do tempo.

4.4.2 Quarto Estudo – Vantagens da Otimização Multicritério

Esse estudo está focado nas melhorias que a metodologia desenvolvida para otimização multicritério do corte de carga pode apresentar em comparação com um método tipicamente adotado na prática. Nesse caso, são os ganhos conseguidos com o Módulo 2 que estão sendo avaliados.

Para tanto, simula-se uma solicitação de **corte de carga de 5,5 MW**, tendo como **duração estimada 40 minutos**, **tolerância** para cortes inferiores ao solicitado igual a **0%** e **máxima prioridade** admitida para o corte igual a **C5**.

As características básicas do sistema teste são as mesmas do estudo anterior conforme Figura 4.8, incluindo as constantes para modelagem da carga, fator de demanda e taxas de substituição.

A primeira solução do corte de carga está baseada numa prática comumente adotada pelas distribuidoras, que consiste na ordenação dos alimentadores apenas pelo critério de prioridade das cargas. De posse dessa lista, a solicitação de corte de carga é atendida por meio do empilhamento dos alimentadores, em ordem crescente de prioridade, até atingir o montante de carga requerido. Cabe destacar que no caso de dois alimentadores apresentarem a mesma prioridade de carga, considera-se como mais prioritário aquele que possui maior carregamento.

Portanto, o primeiro passo para execução do corte seguindo essa abordagem monocritério, consiste na elaboração da Tabela 4.8, que está mostrada na seqüência. É

importante destacar que a carga considerada para cada alimentador leva em conta apenas o carregamento ativo atribuído aos consumidores, uma vez que esse método é estático e não possui um algoritmo para atualizar os valores destinados às perdas elétricas. Já na ferramenta computacional desenvolvida para otimização multicritério, utiliza-se valores carregados de uma base de dados que pode ser *on-line* com um sistema de aquisição de dados, por exemplo o *SCADA*. A partir dessas leituras, é possível executar um fluxo de potência para determinar outras variáveis do sistema, dentre elas as perdas elétricas, que são contabilizadas no processo de otimização do corte de carga.

Tabela 4.8 – Ordenação crescente dos alimentadores de acordo com a prioridade de carga

Ordem	Alimentador	Prioridade	Carga [kW]
1°	AL14	A1	806,32
2°	AL11	A2	502,21
3°	AL09	A3	895,19
4°	AL05	A3	1113,32
5°	AL07	A3	1541,93
6°	AL04	A4	1190,33
7°	AL12	A4	1340,47
8°	AL06	A4	2446,14
9°	AL10	B1	2728,73
10°	AL13	B3	1642,11
11°	AL01	B4	1326,77
12°	AL02	B4	1894,22
13°	AL08	B4	2067,47
14°	AL03	B4	2611,94

Assim, para atender ao corte solicitado de 5,5 MW, por meio do desligamento dos alimentadores seguindo a metodologia monocritério, o **corte sugerido** é: **AL14 AL11 AL09 AL05 AL07 AL04**, conforme destacado pelas setas na tabela anterior, somando aproximadamente 6,05 MW. Nota-se claramente que a lógica utilizada consiste no

empilhamento dos alimentadores de acordo com a ordem da tabela acima até que a soma das cargas desconectadas atinjam no mínimo o corte solicitado.

Para permitir uma comparação com a solução que será apresentada pelo processo otimizado, tem-se a seguir a pontuação que esta alternativa de corte receberia caso fosse avaliada pela formulação multicritério com as taxas de substituição adotadas para a ferramenta computacional. Também são apresentados os valores absolutos para cada critério nessa mesma avaliação.

- Corte Sugerido: **AL14 AL11 AL09 AL05 AL07 AL04**
- Carga Total Desconectada*: **6049,30 kW**
- Pontuação Multicritério: 55,19
- Delta Corte: 9,99 % = 549,30 kW
- Maior Prioridade Desconectada: A4
- Folga DEC: 5,000%
- Folga FEC: -0,800%
- Folga DIC: 1,961%
- Folga FIC: 10,000%

* Como nesse método as perdas não estão disponíveis para contabilização, consideram-se apenas as cargas ativas dos consumidores desconectados.

O próximo passo é a execução do mesmo corte de carga por meio da otimização via SGA e PMOGA. Como o intuito é comparar as vantagens da metodologia de otimização multicritério, o módulo 1, não será executado. A solução ótima encontrada pelos dois métodos de otimização desenvolvidos está apresentada na seqüência:

- Corte Sugerido: **AL04 AL05 AL06 AL09**
- Demanda Total Desconectada: 5759,014 kW
- Carga Total Desconectada*: 5644,98 kW
- Pontuação Multicritério: 70,87
- Delta Corte: 4,71 % = 259,014 kW

- Maior Prioridade Desconectada: A4
- Folga DEC: 23,500%
- Folga FEC: 41,412%
- Folga DIC: 25,333%
- Folga FIC: 10,000%

* Nesse item apenas as cargas ativas dos consumidores desconectados pela ação do corte são consideradas, o que permite a comparação direta com o mesmo indicador para o caso anterior.

Assim, de imediato, pela pontuação multicritério atribuída a cada alternativa de corte, pode-se ver que a solução otimizada é melhor do que aquela encontrada apenas pela consideração do critério da prioridade de carga, como já era esperado. É importante destacar que mesmo com a consideração de outros critérios na avaliação, a metodologia de otimização proposta apontou como máxima prioridade de carga desconectada a categoria A4, da mesma forma que o processo monocritério.

Já, levando-se em consideração os outros critérios avaliados, torna-se ainda mais relevante a utilização da metodologia multicritério. Pode-se verificar que há ganhos tanto para a concessionária, que terá uma redução de aproximadamente 404 kW não mais desconectados nesse corte (melhoria para a energia não faturada), quanto para os consumidores, que sentirão o reflexo direto dos indicadores de continuidade. Nesse último quesito, nota-se uma grande melhoria na metodologia multicritério em relação à monocritério, principalmente nos indicadores DEC, FEC e DIC.

Para reforçar ainda mais os benefícios da metodologia multicritério desenvolvida nesse trabalho de dissertação, pode-se fazer um comentário a respeito da metodologia proposta por Andrade, Knolseisen, Gaulke *et al.* (2006). Nesse trabalho, os autores utilizam uma metodologia multicritério para auxiliar a operação dos sistemas de distribuição nas situações de desligamento de carga e restabelecimento do fornecimento aos consumidores. Essa metodologia se baseia na classificação dos alimentadores candidatos ao corte de carga, utilizando como critérios os indicadores de continuidade

DEC e FEC e de prioridades de carga. A formulação para avaliação multicritério é bastante similar ao que foi desenvolvido na metodologia proposta nesta dissertação.

Com isso, certamente grandes benefícios são conseguidos com a metodologia apresentada, como distintas formas para classificar os alimentadores, em virtude do grau de importância que cada descritor recebe por parte do decisor. Entretanto, Andrade, Knolseisen, Gaulke *et al.*(2006) não incorporam na função multicritério para corte de carga a minimização da energia não suprida (ENS), deixando a cargo do operador a escolha dos alimentadores que efetivamente serão desligados, até que seja atendida a necessidade de corte ou religamento. Essa característica pode tornar mais difícil a otimização do corte de carga, tendo em vista o interesse da distribuidora em diminuir a energia não faturada durante os eventos de corte de carga.



CAPÍTULO
5

CONCLUSÕES E
RECOMENDAÇÕES PARA
TRABALHOS FUTUROS

***E**ste último capítulo apresenta as considerações finais sobre os assuntos abordados neste trabalho, ressaltando as peculiaridades da metodologia desenvolvida para o corte de carga em sistemas de distribuição. Também são apresentadas algumas linhas de pesquisa que podem ser mais amplamente exploradas, a partir das contribuições deste trabalho.*

5.1 Conclusões

O presente trabalho de dissertação focou o estudo e desenvolvimento de uma metodologia de apoio à decisão de corte de carga, com o objetivo de contribuir tanto para a melhoria do atendimento aos consumidores de energia elétrica, quanto para a própria concessionária de distribuição, principalmente no aspecto de minimização dos seus prejuízos nessas situações de corte de carga.

Com a finalidade de propor uma metodologia que contemple os desejos, tanto de consumidores quanto da distribuidora de energia elétrica, foi elaborada na etapa de pesquisa bibliográfica uma análise dos conceitos envolvidos no problema de corte de carga, como: qualidade de energia, métodos de otimização, modelagem de cargas variáveis com a tensão e critérios para a composição da função objetivo.

Baseada nessa análise, desenvolveu-se a metodologia para corte de carga proposta nesse trabalho, constituída basicamente por dois módulos distintos. O primeiro deles (Módulo 1) está fundamentado na variação da demanda elétrica com a tensão, sendo responsável por determinar as tensões ótimas de despacho nas subestações. O seu objetivo é reduzir a demanda de energia sem infringir o limite mínimo de tensão nos pontos de carga, garantido assim uma diminuição da necessidade complementar de corte de carga via desligamento de alimentadores.

Já o Módulo 2 tem a função de completar a solicitação de corte de carga, através do desligamento de alimentadores. Para tanto, foram desenvolvidos dois métodos (baseados em PMOGA e SGA) para realizar essa tarefa de maneira otimizada, com foco em múltiplos critérios, que são: DEC, FEC, DIC, FIC, ENS e prioridade das cargas. As duas metodologias multicritério para otimização das ações de desligamento contemplam o uso de ferramentas de inteligência artificial, mais especificamente algoritmos genéticos (AG). Essa técnica é particularmente interessante para aplicação no problema modelado, dada à sua habilidade para trabalhar com problemas de complexa modelagem matemática, não-diferenciáveis e compostos por variáveis contínuas e discretas. A diferença básica entre os dois métodos de otimização disponíveis no Módulo 2 está no número de soluções apresentadas como saída por cada um deles, uma vez que, do algoritmo PMOGA resulta

uma lista com soluções não-dominadas que são apresentadas para definição do corte pelo decisor, enquanto que a solução via SGA apresenta uma única alternativa de corte otimizada.

Além dos métodos otimizados, também foi desenvolvido um algoritmo para execução de uma busca exploratória exaustiva, de extrema importância para a realização dos testes de validação da metodologia proposta.

Cabe destacar que uma das inovações da metodologia proposta foi a fusão das técnicas de otimização utilizando AG descritas acima com uma metodologia de avaliação multicritério para pontuação de cada alternativa de corte, direcionada para os critérios anteriormente mencionados.

Para possibilitar que essa metodologia seja aplicada tanto para a pré-configuração de parâmetros dos sistemas automáticos de corte de carga (ERAC) quanto para as solicitações *on-line* de corte de carga, os algoritmos desenvolvidos para cada um dos módulos foram integrados em um programa computacional. Essa ferramenta foi implementada em um ambiente gráfico com facilidades para execução de estudos de caso e armazenamento de informações em banco de dados.

Por meio desse sistema computacional, foram executados alguns testes para validação da metodologia para corte de carga proposta, sendo o resultado bastante positivo. Nessas simulações, que contaram com dados provenientes de sistemas reais de distribuição, pôde-se verificar a eficácia dos algoritmos para redução da necessidade de corte de carga e otimização das ações de desligamento. Os testes realizados permitiram também verificar as melhorias conseguidas com a metodologia desenvolvida, ressaltando os ganhos nos indicadores de continuidade para os consumidores de energia elétrica e a diminuição na energia não faturada nos intervalos de corte de carga por parte das concessionárias.

Dessa forma, entende-se que os objetivos enunciados no início dessa dissertação foram alcançados com êxito, contanto com a elaboração teórica e comprovação de resultados via simulações práticas.

5.2 Recomendações para Trabalhos Futuros

Esta dissertação pode ser considerada como um passo inicial para novos desenvolvimentos. Entre os possíveis trabalhos futuros relacionados ao que foi abordado nesta dissertação, destacam-se:

- Desenvolver outras formas de calcular a pontuação multicritério, considerando não apenas o valor mais comprometido para cada critério de todos alimentadores indicados para o corte em determinada solução. Usar, por exemplo, cálculo do desvio padrão considerando cada alimentador indicado para corte na solução avaliada, evitando o descarte de uma alternativa de corte por causa de um critério comprometido em um único alimentador;

- Estudar novos critérios que possam ser considerados na avaliação multicritério, com foco em diferentes atributos dos sistemas de distribuição. Como exemplo recomenda-se a verificação da viabilidade de se considerar a redução das perdas elétricas na escolha da melhor alternativa de corte e os custos diretos sofridos pelos consumidores decorrentes da descontinuidade no suprimento de energia;

- Incluir, tanto na metodologia de regulação de tensão, quanto na otimização do corte de carga, a possibilidade de execução de reconfiguração nas redes de distribuição, por meio de chaves seccionadoras controladas remotamente. Essa consideração daria maior flexibilidade para as ações de corte, permitindo uma maior segregação dos alimentadores em termos das cargas prioritárias e indicadores de continuidade;

- Análise de sensibilidade das taxas de substituição, observando a sua influência na classificação das soluções ótimas, para permitir a sistematização do processo de escolha desses atributos (pesos) ;

- Também com relação às taxas de substituição, pode-se investigar o uso de variáveis lingüísticas e conjuntos difusos para representar cada uma delas.

APÊNDICE A

Ferramenta Computacional para Apoio à Decisão de Corte de Carga

A.1 Apresentação Geral do Programa Computacional

A ferramenta computacional foi desenvolvida em um ambiente gráfico, possibilitando grande facilidade na operação dos módulos propostos para a solução do problema do corte de carga.

O programa opera de forma integrada a um banco de dados, que armazena todas as informações pertinentes ao problema, tais como: base de dados do sistema elétrico, tabela de codificação dos condutores, abrangência do corte de carga e configuração do modelo multicritério.

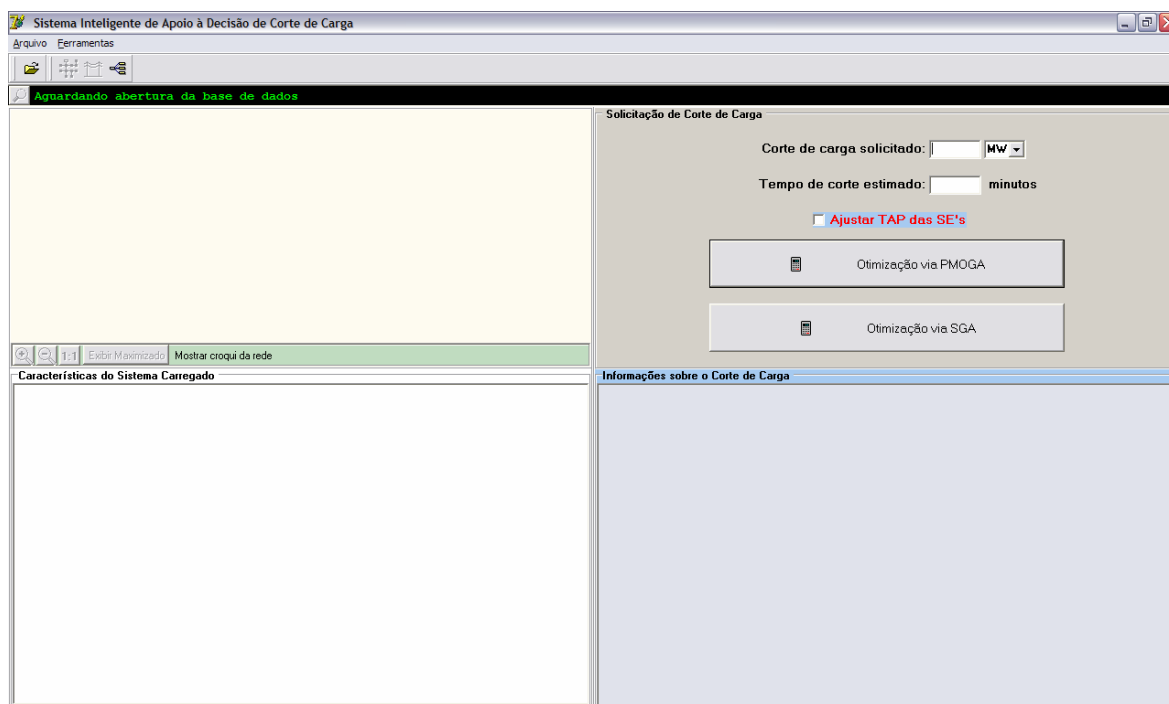


Figura A.1– Tela de abertura do programa

É através da tela de abertura, mostrada na Figura A.1 se realiza o gerenciamento do programa, permitindo o acesso a todas as demais funcionalidades da ferramenta desenvolvida. Nessa tela inicial é possível: carregar a base de dados, visualizar a disposição física da rede e as características elétricas do sistema carregado, acessar as telas para definir a abrangência do corte de carga e as taxas de substituição da metodologia multicritério, definir a solicitação do corte de carga, definir os módulos que serão

utilizados para otimização do corte de carga e obter as informações sobre o corte de carga proposto após a execução do programa.

Para melhor esclarecer as características dessa primeira janela do programa, as funções comentadas anteriormente serão apresentadas em figuras que dão maior foco a determinados aspectos da tela principal.

A.1.1 Gerenciamento da Base de Dados

Essa área contém uma barra de ferramentas com alguns ícones, destacados na Figura A.2 com a numeração de 1 a 5, que permitem a execução de tarefas ligadas ao gerenciamento da base de dados. O menu superior, com as opções *Arquivo* e *Ferramentas*, permite acesso às mesmas funções.

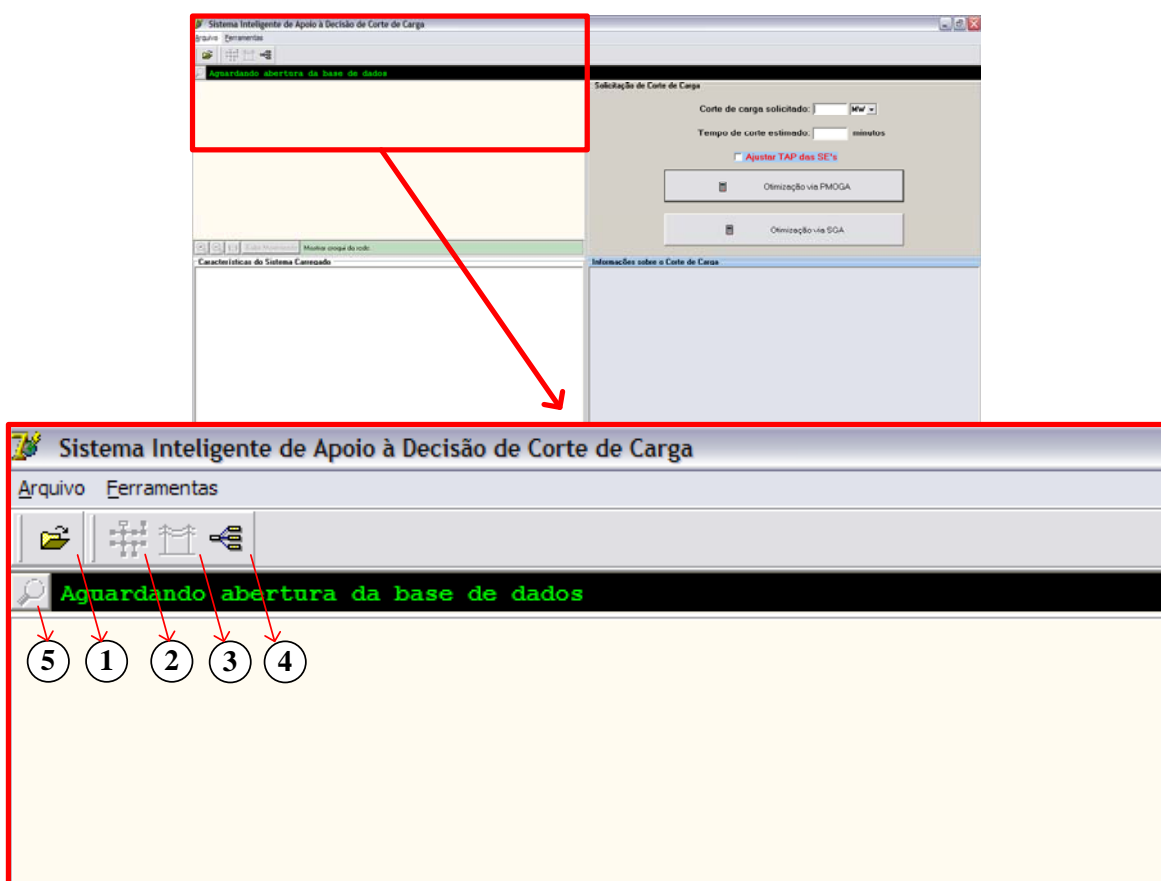


Figura A.2 – Gerenciamento da base de dados

- 1) Abrir base de dados:** Esse ícone abre uma caixa de busca pela qual o usuário pode escolher a base de dados que será carregada. Nessa base de dados estão presentes todas as informações com relação aos alimentadores, incluindo aquelas

relacionadas às metas e valores acumulados dos indicadores de continuidade, bem como a contribuição percentual de cada alimentador no número total de consumidores dos conjuntos definidos para cálculo desses índices.

- 2) **Selecionar a abrangência do corte:** Depois de carregada a base de dados, esse ícone se torna ativo e é por meio dele que o usuário pode definir quais alimentadores, presentes na base de dados carregada, estarão disponíveis para as ações de corte de carga. A seleção dos alimentadores, organizados de acordo com a SE e COD a que pertencem, é feita em uma janela a parte, mostrada na Figura A.3, abaixo.

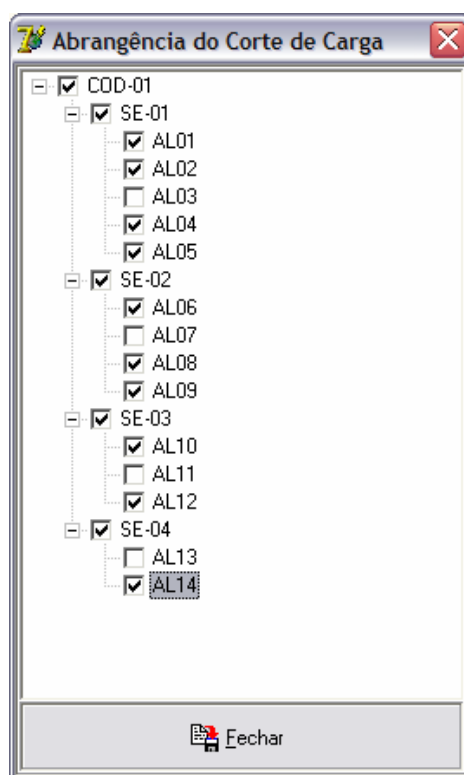


Figura A.3 – Janela para seleção da abrangência do corte de carga

- 3) **Visualizar tabela de condutores:** Esse ícone dá acesso a uma janela que proporciona a visualização das características elétricas associadas aos códigos dos condutores tabelados. Nessa janela, conforme mostrado na Figura A.4 há uma barra de ferramentas que contém ícones com as funções para editar, salvar e importar dados nessa tabela.

Visualizar tabela de condutores

Tabela de Condutores

Código	R+/km	X+/km	Ro/km	Xo/km	I _{max} [A]
2 CA	0,948	0,468	1,125	1,926	152
4 CA	1,504	0,486	1,681	1,943	125
4 CAA	1,597	0,522	1,774	1,979	125
1/0 CA	0,595	0,451	0,772	1,917	203
1/0 CAA	0,696	0,52	0,873	1,978	220
4/0 CA	0,297	0,424	0,474	1,882	314
4/0 CAA	0,368	0,475	0,545	1,932	330
1 CU	0,47	0,457	0,617	1,918	270
1/0 CU	0,377	0,451	0,554	1,908	310

R e X [ohm] I_{max} [A]

Figura A.4 – Janela para visualização da tabela de condutores

- 4) **Configuração do modelo multicritério:** Clicando nesse ícone tem-se acesso a uma janela que mostra as taxas de substituição atribuídas a cada ponto de vista do modelo multicritério, de acordo com o perfil ativo. Nela o usuário pode ativar ou excluir um perfil já existente, bem como criar um novo perfil com as taxas de substituição que desejar.

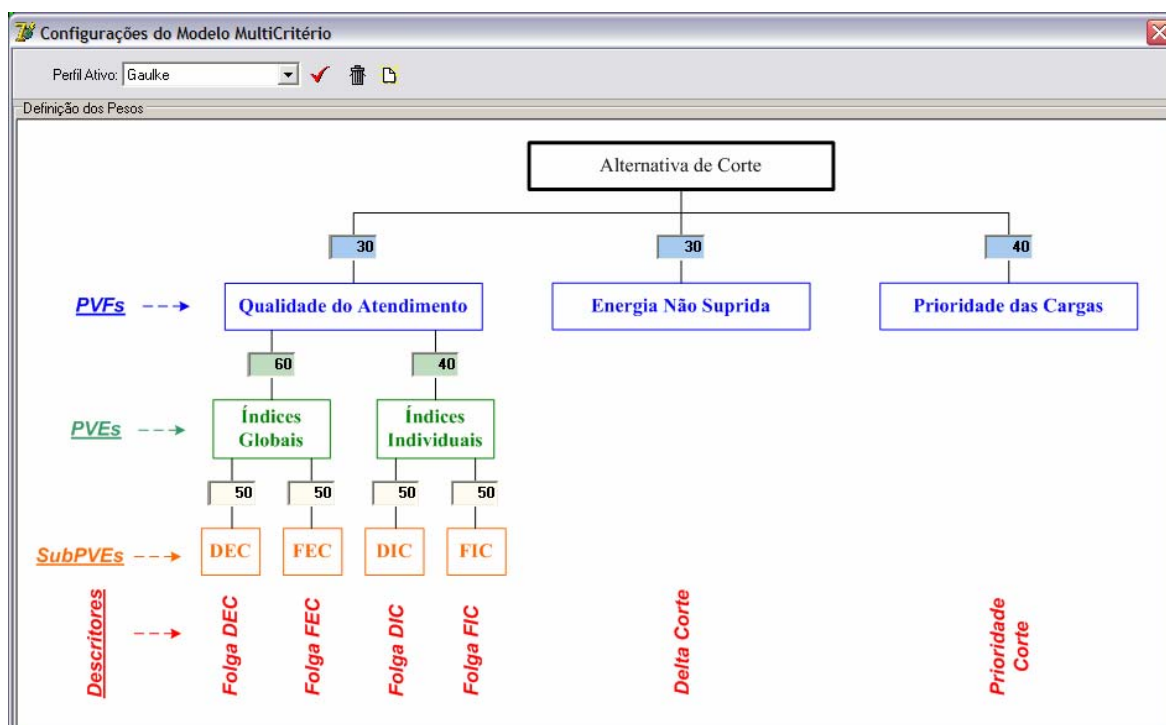


Figura A.5 – Configuração do modelo multicritério

- 5) **Editar dados:** Para que os dados do sistema elétrico carregado possam ser visualizados e editados, esse ícone estabelece a conexão com uma nova janela gráfica, mostrada na Figura A.6.

Dados dos trechos					Dados da barra final				
Barras									
Nr	Inicial	Final	Condutor	L [m]	X	Y	P [kW]	Q [KVAr]	
1	0	1	4/0 CA	305	4305	0	73,57	14,69	
2	1	2	4/0 CA	4100	8405	0	27,12	17,96	
3	2	50	4/0 CA	940	9345	0	57,91	51,82	
4	2	51	4 CA	300	8405	300	40,42	48,28	
5	2	3	4/0 CA	700	8405	-700	34,54	23,61	
6	3	49	4 CA	590	8405	-1290	62,99	28,89	
7	3	4	4/0 CA	1910	10315	-700	29,85	23,56	
8	4	48	4 CA	245	10560	-700	77,43	64,27	
9	4	5	4/0 CA	2000	10315	1300	12,47	19,2	
10	5	6	4/0 CA	20	10315	1320	43,47	20,56	
11	6	7	4/0 CA	270	10315	1590	45	35,12	
12	7	8	4/0 CA	240	10315	1830	26,93	9,19	
13	8	9	4/0 CA	150	10315	1980	49,71	37,86	
14	9	10	4/0 CA	170	10315	2150	7,1	6,06	
15	10	11	4/0 CA	910	10315	3060	52,43	55,56	
16	11	12	4/0 CA	750	10315	3810	11,62	6,11	

Figura A.6 – Edição dos dados do sistema elétrico carregado

Na barra de ferramentas superior, o usuário pode optar por editar e salvar os dados carregados, ou então importá-los de um arquivo externo para serem incluídos na base de dados carregada. Cada alimentador (AL) está atrelado a uma subestação (SE), que por sua vez pertence a um determinado centro de operação da distribuição (COD). Assim, para visualizar os dados elétricos de cada alimentador, deve-se selecionar inicialmente o COD e a SE na listagem disponível na tela. Os dados mostrados na tabela são referentes a cada trecho do alimentador, definido como uma seção elétrica entre duas barras, a inicial e a final. Apresenta-se assim, para cada trecho, o código do condutor utilizado e o comprimento do mesmo. Já os dados de carga instalada ativa (P) e reativa (Q), bem como a posição física de cada carga (X e Y) são atribuídos a cada barra final de trecho. Essa forma de disposição dos dados permite uma maior condensação das tabelas de dados e é utilizada

no algoritmo de fluxo de potência e otimização do corte de carga. Além dos dados por trecho dispostos na tabela, há também uma caixa que registra informações relevantes para o alimentador como um todo, que são: tensão base em kV, carga mais prioritária do alimentador, fator de demanda (FD) e os parâmetros associados à modelagem da carga ZIP, com os termos referentes aos percentuais de potência (k1), corrente (k2) e impedância constante (k3). Há ainda uma caixa mostrando o TAP original da SE e a sua disposição física (X e Y).

A.1.2 Informações Sobre o Sistema a ser Analisado

Depois de carregar a base de dados, o programa exibe algumas informações sobre o sistema elétrico, que estão detalhadas na Figura A.7. Essa área com informações sobre o sistema elétrico contém duas divisões: uma mostrando o croqui da rede elétrica (1) e outra que apresenta as características elétricas do sistema carregado na forma de um relatório (2).

A divisão mais ao alto é a que apresenta um croqui da rede de distribuição, mostrando a distribuição física das subestações, representadas por um quadrado azul, e todas as cargas dos alimentadores, representadas por círculos. Os círculos que representam as cargas podem ser da cor verde, quando se trata das cargas de alimentadores disponíveis para o corte de carga, ou da cor vermelha, que são aquelas cargas de alimentadores não disponíveis para o corte. Essa questão do alimentador estar ou não disponível para o corte é definida pelo usuário do programa e pode também estar representando um alimentador que já está desconectado no momento da solicitação do corte. Há uma barra de ferramentas no rodapé desse croqui (5), que permite o manuseio da figura gerada, com a possibilidade de modificar o *zoom* ou então exibir o croqui em uma janela separada, de forma maximizada.

A caixa inferior dessa área apresenta um relatório (2) com diversas informações sobre o sistema elétrico carregado, inclusive com valores de perda ativa e o valor mínimo de tensão observado no alimentador. Essas informações são disponibilizadas uma vez que, após o carregamento da base de dados, o programa executa um fluxo de potência em toda a rede.

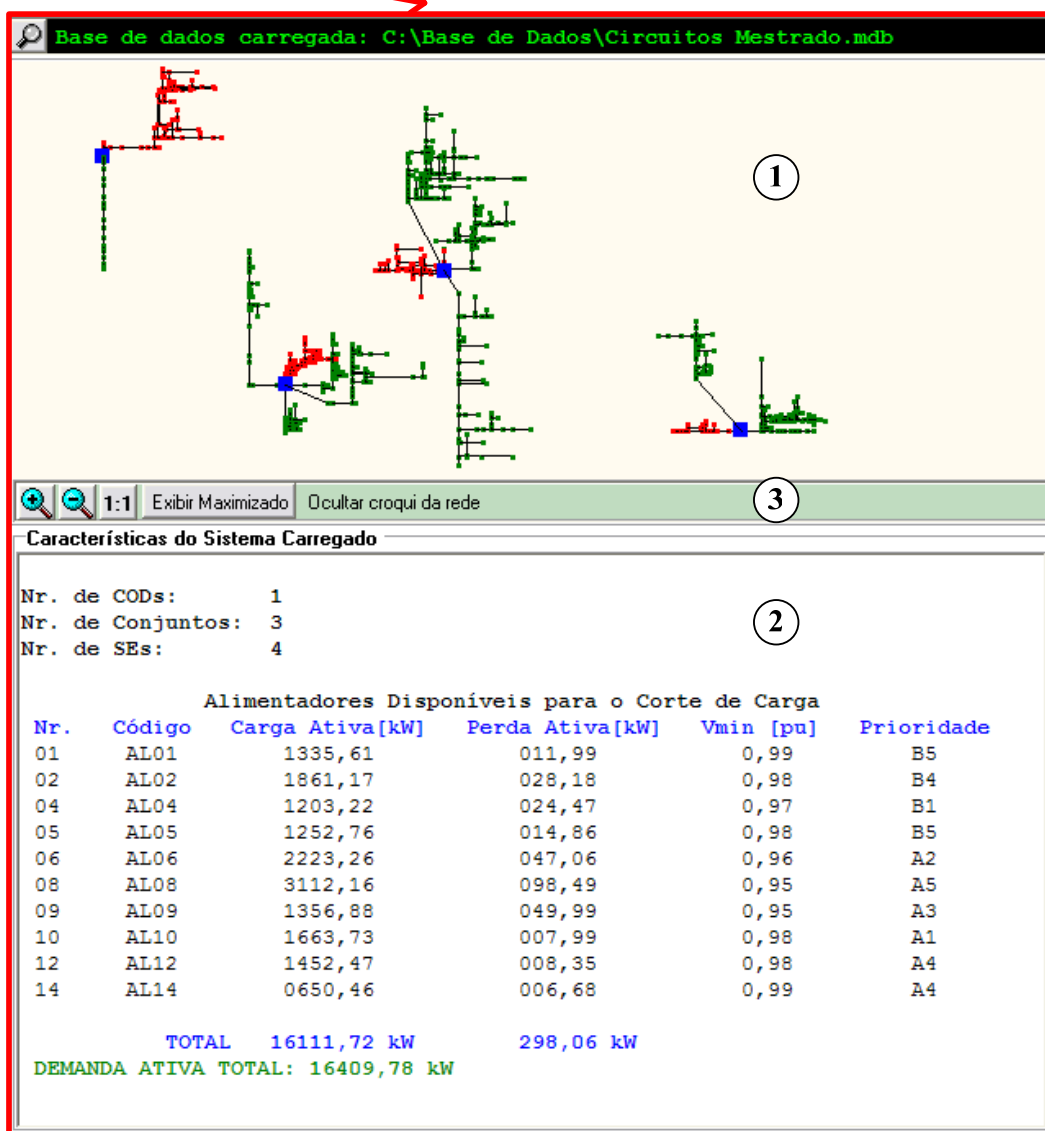
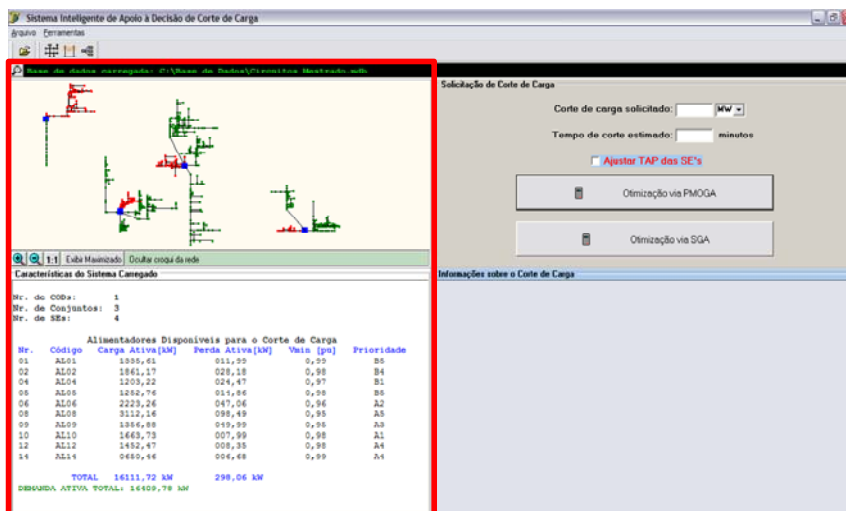


Figura A.7 – Informações sobre o sistema elétrico carregado

A.1.3 Solicitação de Corte de Carga

Nessa área da janela principal do programa, mostrada na Figura A.8, determinam-se as ações relacionadas com o corte de carga propriamente dito.

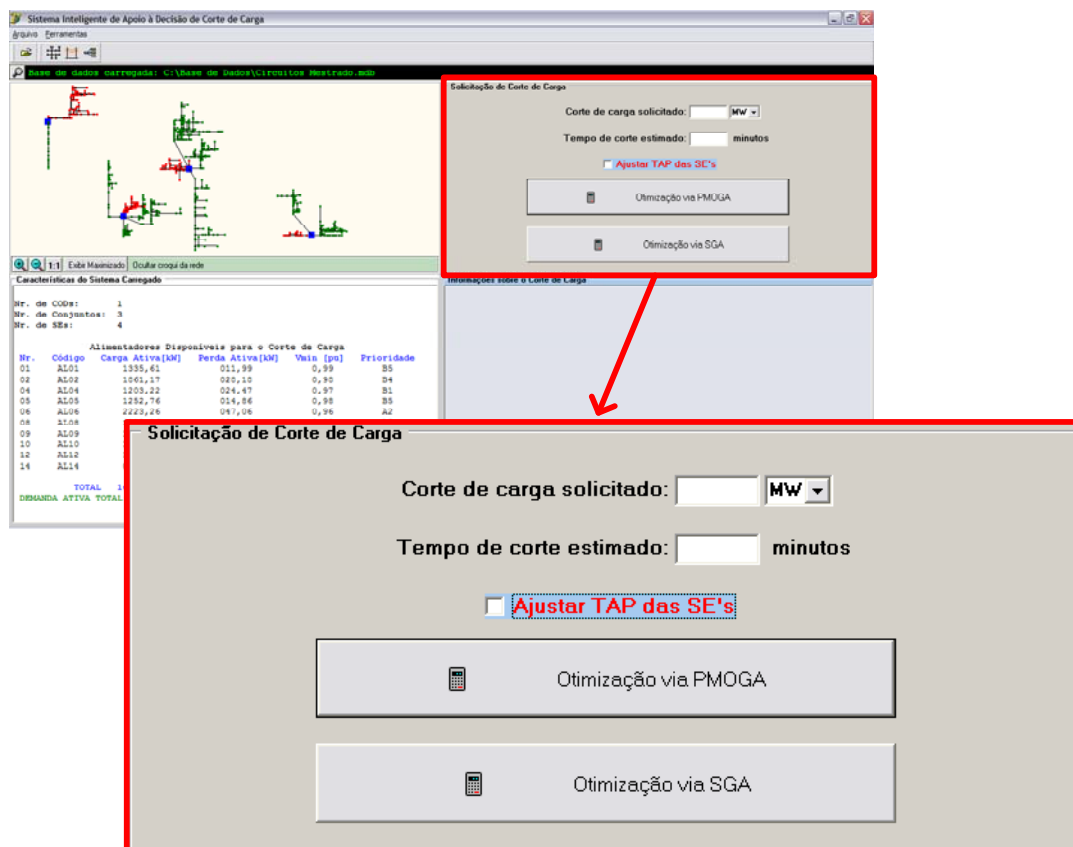


Figura A.8 – Solicitação de corte de carga

Há duas caixas de texto, pelas quais o usuário informa a quantidade de demanda ativa que precisa ser reduzida bem como a duração estimada para o corte de carga.

Por meio da caixa estilo *checkbox* com a opção “Ajustar TAP das SE’s”, é possível definir se o Módulo 1 da metodologia proposta será executado. Os outros dois botões presentes nessa área são referentes ao Módulo 2 da metodologia proposta, permitindo que seja executada a otimização do desligamento dos alimentadores para completar a necessidade de corte de carga. As opções são a otimização via PMOGA ou SGA, que já foram descritas no capítulo sobre a metodologia proposta.

A.1.4 Informações sobre o Corte de Carga

Essa área apresenta um relatório contendo informações sobre o corte de carga executado, sugerido por uma das duas metodologias de otimização de desligamento dos alimentadores acessíveis na tela superior. Esse relatório apresenta desde a listagem dos alimentadores cortados, com os valores absolutos dos critérios para a alternativa de corte executada, até os valores de tensão mínima nos alimentadores e TAP sugerido para as SEs.

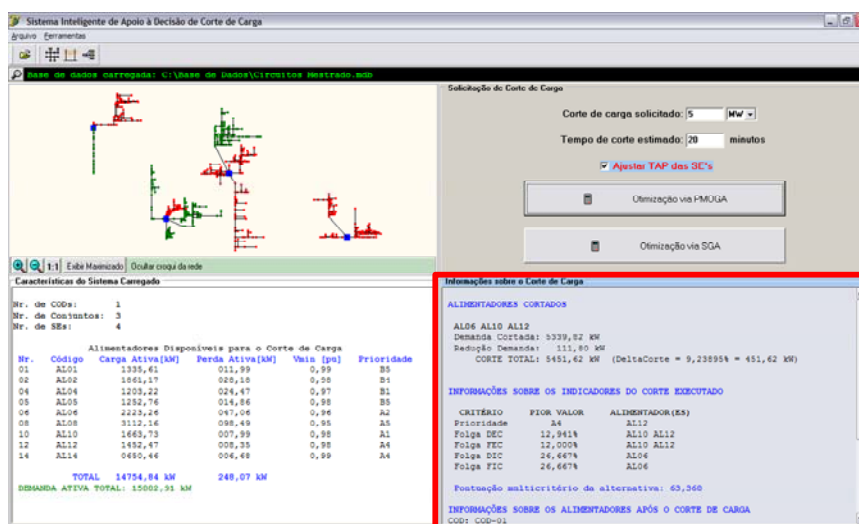


Figura A.9 – Informações sobre o corte de carga

Na figura anterior não se pode ver o relatório completo com as informações sobre o corte de carga, portanto apenas com caráter ilustrativo, tem-se um exemplo completo desse relatório mostrado na Figura A.10, a seguir:

ALIMENTADORES CORTADOS					
AL06 AL10 AL12					
Demanda Cortada: 5339,82 kW					
Redução Demanda: 111,80 kW					
CORTE TOTAL: 5451,62 kW (DeltaCorte = 9,23895% = 451,62 kW)					
INFORMAÇÕES SOBRE OS INDICADORES DO CORTE EXECUTADO					
CRITÉRIO	PIOR VALOR	ALIMENTADOR(ES)			
Prioridade	A4	AL12			
Folga DEC	12,941%	AL10 AL12			
Folga FEC	12,000%	AL10 AL12			
Folga DIC	26,667%	AL06			
Folga FIC	26,667%	AL06			
Pontuação multicritério da alternativa: 63,360					
INFORMAÇÕES SOBRE OS ALIMENTADORES APÓS O CORTE DE CARGA					
COD: COD-01					
AL	P[kW]	LP[kW]	SE	TAP	Vmin[pu]
AL01	1344,21	12,53	SE-01	0,975	0,96
AL02	1864,22	28,86	SE-01	0,975	0,95
AL04	1224,54	25,61	SE-01	0,975	0,94
AL05	1255,26	15,33	SE-01	0,975	0,96
AL06	-> CORTADO				
AL08	3210,65	98,49	SE-02	1,000	0,95
AL10	-> CORTADO				
AL12	-> CORTADO				
AL14	0652,41	07,28	SE-04	0,950	0,93

Figura A.10 – Exemplo de relatório com as informações sobre o corte de carga

A.2 Módulo 1: Controle de Tensão nas Subestações

Esse módulo é responsável por reduzir a necessidade de corte de carga por meio da regulação da tensão de despacho das subestações. Ele é acionado através do *check box* mostrado na Figura A.8, sendo que, quando essa caixa é marcada, aparece para o usuário a caixa de diálogo exibida na Figura A.11, que permite definir qual a tensão mínima que será aceita em qualquer ponto de carga de cada alimentador.

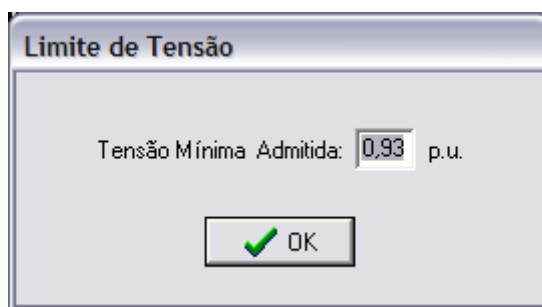


Figura A.11 – Limite de tensão para o Módulo 1

Com essa opção marcada, ou seja, com a determinação de que o módulo de regulação de tensão deve ser executado, assim que uma das duas opções de otimização do corte de carga é acionada, o algoritmo do módulo 1 efetua os cálculos e apresenta o ajuste proposto para o TAP de cada subestação, assim como a redução de demanda ativa em valor absoluto e em percentual do corte solicitado (Figura A.12).

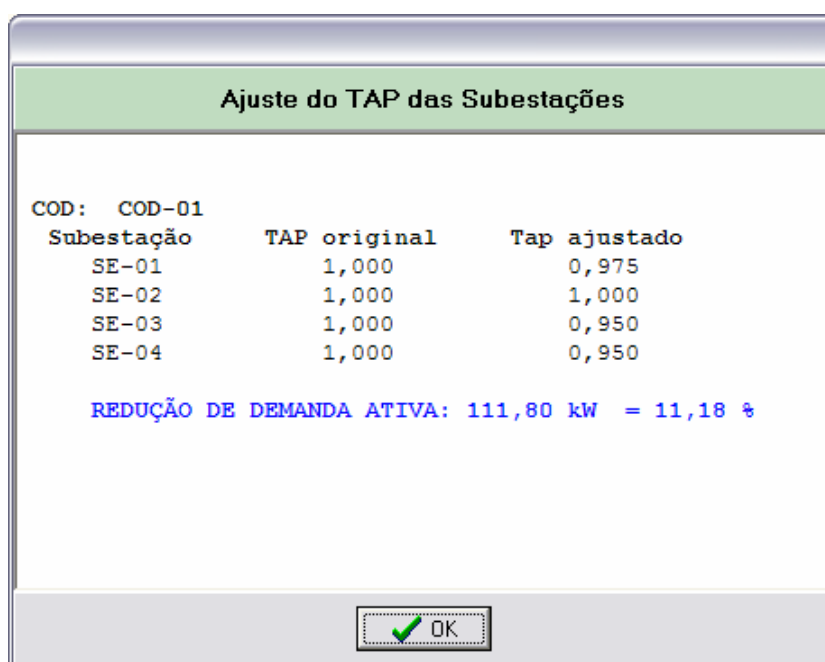


Figura A.12 – Resultados do módulo de redução da necessidade de corte de carga (Módulo 1)

A.3 Módulo 2: Corte de Carga via Desligamento de Alimentadores

As duas ferramentas para otimização das ações de desligamento dos alimentadores utilizando algoritmo genético, são acessíveis através de botões na área de solicitação do corte de carga, sendo eles: “Otimização via PMOGA” e “Otimização via SGA”.

Cabe lembrar que a diferença principal entre as duas ferramentas é que a otimização via PMOGA apresenta como saída uma lista com várias soluções não dominadas, classificadas de acordo com a pontuação multicritério, facultando ao decisor a opção pela alternativa de corte. Já a otimização via SGA apresenta uma única solução determinativa de corte de carga, estando mais voltada para situações em que o decisor se interesse apenas pela solução mais bem pontuada na avaliação multicritério.

A.3.1 Otimização via PMOGA

A Figura A.13, apresenta a tela de comando desse processo de otimização, permitindo que o usuário disponha de todas as configurações necessárias para o processo.

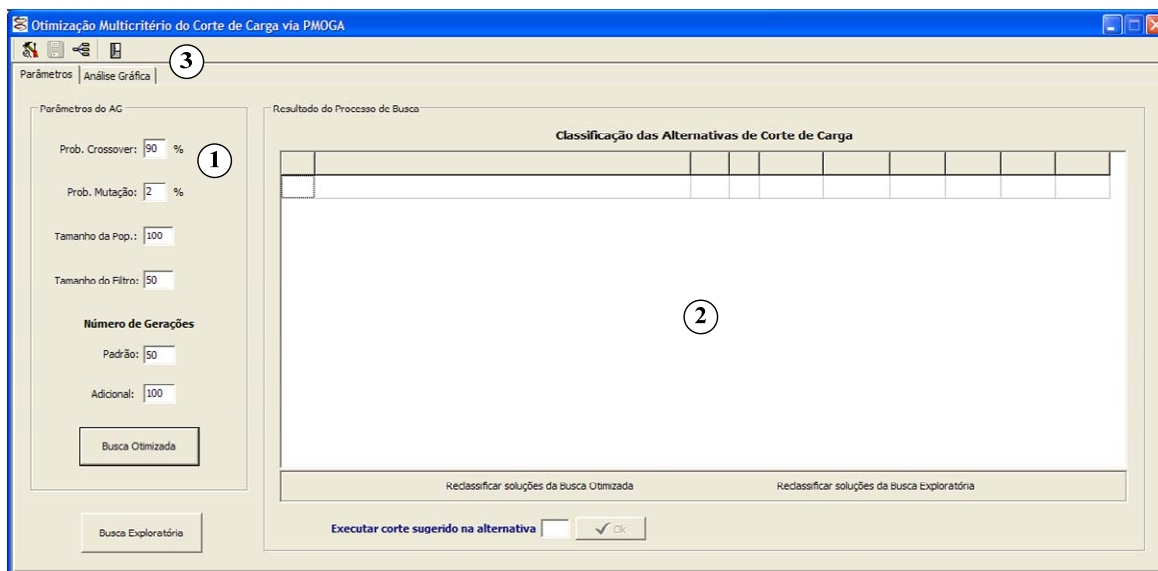


Figura A.13 – Janela para execução da otimização via PMOGA

Essa tela basicamente se divide em três áreas: uma contendo os parâmetros para configuração do algoritmo e as opções pela busca otimizada ou exploratória (1); outra que mostra os resultados do processo de busca (2); e uma terceira que contempla a barra de ferramentas e uma aba para análise gráfica (3).

A.3.1.1 Parâmetros do AG e Escolha do Método de Busca

A Figura A.14 permite maior foco para a área da janela da otimização via PMOGA que serve para inserção dos parâmetros do AG e escolha do método de busca das soluções de corte de carga.

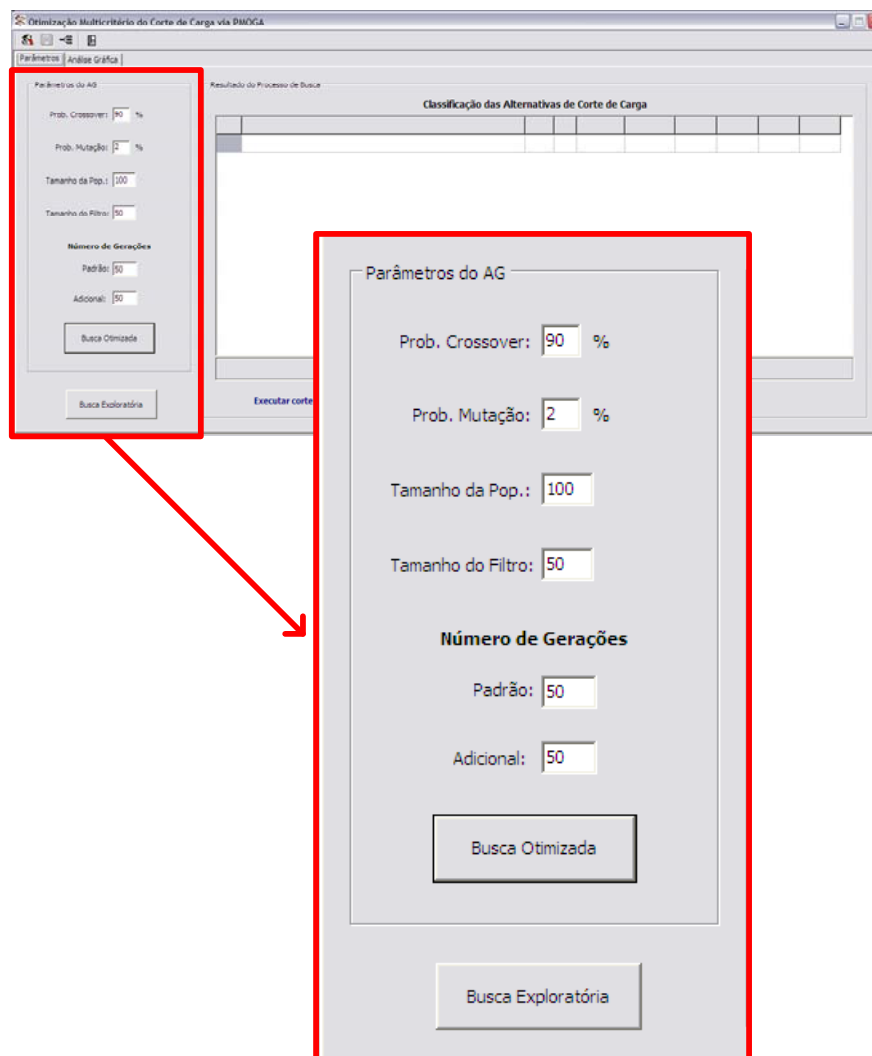


Figura A.14 – Parâmetros do AG e escolha do método de busca

Observe-se que dentro da área denominada “Parâmetros do AG” há caixas de texto que permitem a definição dos parâmetros do algoritmo genético, como as probabilidade de *crossover* e mutação, tamanho da população e do filtro, além dos valores máximos para o número de gerações padrão e adicionais, que estabelecem o critério de parada. Por questões de praticidade, essas caixas de texto já possuem valores padrões preenchidos, os quais podem ser alterados.

Essa área também permite acessar os botões para execução do processo de busca das soluções. O método pertencente ao Módulo 2 é acionado pelo botão denominado “Busca Otimizada”, que executa a otimização das ações de desligamento de cargas através da metodologia PMOGA, descrita no capítulo 3.

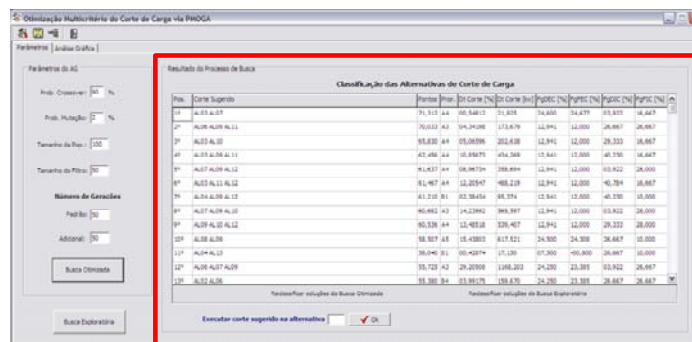
Já o botão “Busca Exploratória” não é uma ferramenta do Módulo 2, mas sim responsável por executar a busca exploratória exaustiva descrita no capítulo anterior. Este processo está presente nessa janela apenas para facilitar a validação do método otimizado via PMOGA, permitindo assim maior praticidade nas etapas de estudo de casos que serão apresentados no próximo capítulo.

A.3.1.2 Resultados do Processo de Busca

Nessa área, conforme a Figura A.15, o programa apresenta uma tabela contendo as soluções não-dominadas encontradas pelo processo de busca, classificadas de acordo com a pontuação multicritério. São evidenciados os valores absolutos dos critérios utilizados, para cada alternativa de corte.

Essa tabela é responsável por apresentar os resultados tanto do processo de busca otimizado quanto da busca exploratória. Para ambos os casos, há dois botões no rodapé da tabela que permitem a reclassificação das soluções, de acordo com a pontuação multicritério recebida por cada indivíduo não-dominado. Essa opção é utilizada quando apenas as taxas de substituição de cada função de valor são alteradas na configuração multicritério. Dessa forma, pode-se ver as variações na avaliação de cada solução em função das modificações nos pesos, sem a necessidade de uma nova execução dos processos de busca.

Nessa área está também disponível a opção para simular uma ação de corte de carga sugerido por uma das alternativas, conforme visualizado no canto inferior esquerdo da figura acima. Com essa simulação, o programa executa o corte sugerido na alternativa indicada pelo usuário na caixa de texto, e gera o relatório com as informações sobre o corte de carga, apresentado na tela principal do programa conforme a Figura A.9.



Resultado do Processo de Busca

Classificação das Alternativas de Corte de Carga

Pos.	Corte Sugerido	Pontos	Prior.	Dt Corte [%]	Dt Corte [kw]	FgDEC [%]	FgFEC [%]	FgDIC [%]	FgFIC [%]
1º	AL03 AL07	71,312	A4	00,54812	21,925	24,600	24,677	03,922	16,667
2º	AL06 AL09 AL11	70,033	A3	04,34198	173,679	12,941	12,000	26,667	26,667
3º	AL03 AL10	65,830	A4	05,06596	202,638	12,941	12,000	29,333	16,667
4º	AL03 AL09 AL11	62,456	A4	10,85673	434,269	12,941	12,000	40,230	16,667
5º	AL07 AL09 AL12	61,637	A4	08,96734	358,694	12,941	12,000	03,922	28,000
6º	AL03 AL11 AL12	61,467	A4	12,20547	488,219	12,941	12,000	40,784	16,667
7º	AL04 AL09 AL12	61,210	B1	02,38434	95,374	12,941	12,000	40,230	10,000
8º	AL07 AL09 AL10	60,682	A3	14,23992	569,597	12,941	12,000	03,922	28,000
9º	AL09 AL10 AL12	60,536	A4	13,48518	539,407	12,941	12,000	29,333	28,000
10º	AL08 AL09	58,507	A5	15,43803	617,521	24,500	24,308	26,667	10,000
11º	AL04 AL13	58,040	B1	00,42874	17,150	07,500	-00,800	26,667	10,000
12º	AL06 AL07 AL09	55,725	A3	29,20508	1168,203	24,250	23,385	03,922	26,667
13º	AL02 AL06	55,380	B4	03,99175	159,670	24,250	23,385	26,667	26,667

Reclassificar soluções da Busca Otimizada Reclassificar soluções da Busca Exploratória

Executar corte sugerido na alternativa Ok

Figura A.15 – Resultado do processo de busca

A.3.1.3 Barra de Ferramentas e Análise Gráfica

Essa área contém uma barra de ferramentas com os ícones numerados de 1 a 4 e uma aba, indicada pelo número 5, para abertura de uma janela que permite a visualização de dois gráficos para acompanhamento dos resultados do processo de busca otimizado.

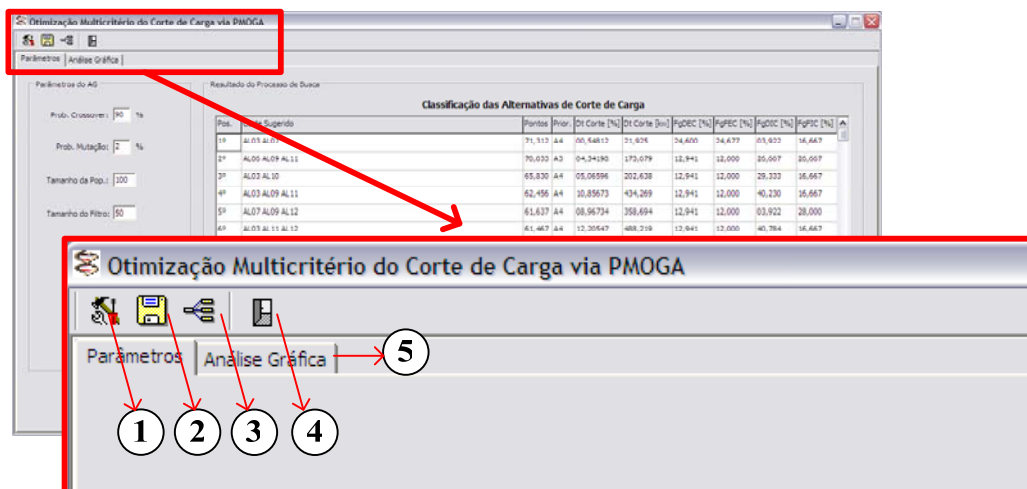


Figura A.16 – Barra de ferramentas e aba para análise gráfica

Com relação aos ícones da barra de ferramentas, as suas funções são descritas a seguir:

- 1) **Configurações do AG:** Esse ícone abre uma nova janela, mostrada na Figura A.17, que permite ao usuário definir algumas configurações sobre o algoritmo genético, como a opção de *crossover* e definição de conservar a mesma população inicial na busca otimizada. É nessa janela que também são definidas as restrições da função multicritério: a tolerância admitida para cortes inferiores ao solicitado e a máxima prioridade de corte permitida numa solução de corte de carga.

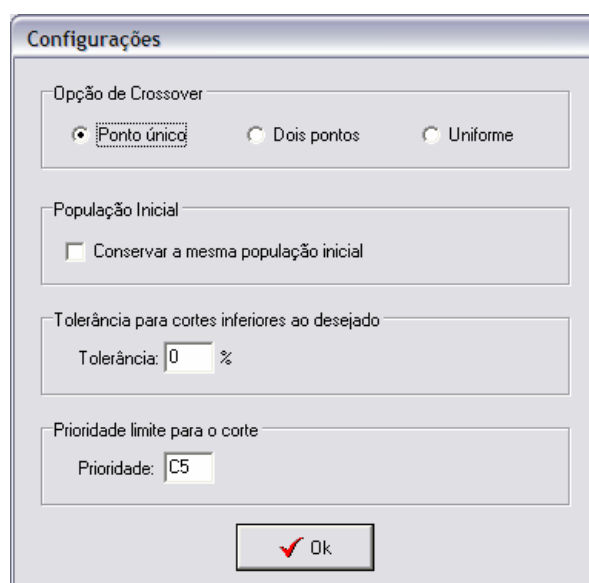


Figura A.17 – Janela com configurações do PMOGA e da função multicritério

- 2) **Salvar estudo de caso:** Essa função é útil para a elaboração de estudos de caso, permitindo um acompanhamento das soluções geradas pelo algoritmo genético comparadas ao processo de busca exploratória, inclusive com os tempos gastos com cada modo de busca. Essa opção só está acessível depois de executada a busca otimizada e a sua saída é um arquivo de texto, que pode ser salvo na pasta desejada pelo usuário, contendo um relatório completo sobre todo o processo.
- 3) **Configuração do modelo multicritério:** Esse ícone acessa a janela que permite a definição das taxas de substituição atribuídas a cada ponto de vista do modelo multicritério, de acordo com o perfil ativo, conforme já apresentado na Figura A.5. Com isso, pode-se propor alterações no valor desses pesos e verificar a nova classificação das alternativas de corte de carga sugeridas pelo processo de busca.
- 4) **Sair:** Esse ícone fecha a janela de otimização via PMOGA, retornando para a janela de abertura do programa.
- 5) **Análise gráfica:** Essa aba abre uma nova janela, vide Figura A.18, que possibilita a visualização de dois tipos de gráficos, auxiliando na análise de desempenho do algoritmo de otimização. Essas opções são: “Pontuação Máxima x Geração”, que mostra o valor da maior pontuação multicritério obtida por uma solução ao longo das gerações; “Evolução das Soluções no Filtro” que exibe no gráfico o número de soluções da fronteira ótima de Pareto, determinada pela busca exploratória, retidas no filtro do PMOGA ao longo do processo de evolução. Esses gráficos podem ser exportados para arquivos externos através do botão “Salvar Gráfico”.

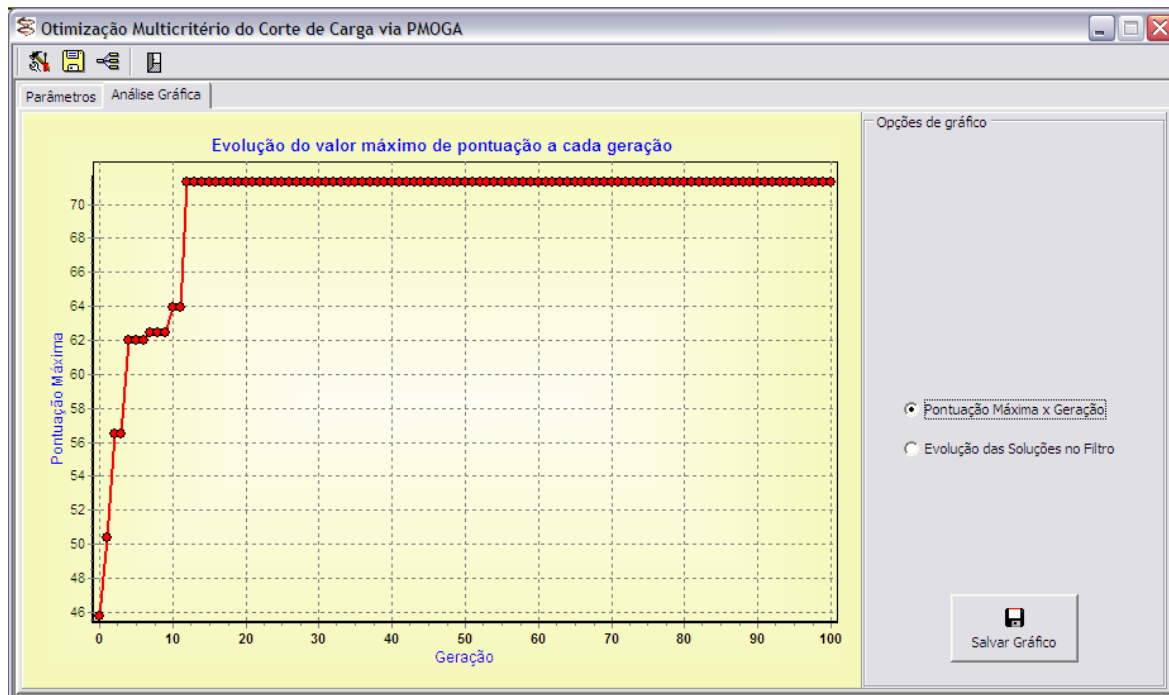


Figura A.18 – Janela de análise gráfica do PMOGA

A.3.2 Otimização via SGA

Essa janela, que pode ser vista na Figura A.19, apresenta as mesmas características que a tela do PMOGA. Há uma área para alteração dos parâmetros do AG, que permite a definição das probabilidades de *crossover* e mutação, do tamanho da população e do critério de parada, que nesse caso pode ser a convergência da aptidão ou o número máximo de gerações. Nessa área, pode-se ainda ordenar a execução da busca das soluções pelo método otimizado, segundo a metodologia SGA descrita no capítulo 3.

Na parte direta dessa tela, o programa apresenta um relatório com os resultados do processo evolutivo, indicando a melhor alternativa de corte encontrada, bem como algumas informações para avaliação do desempenho do AG.

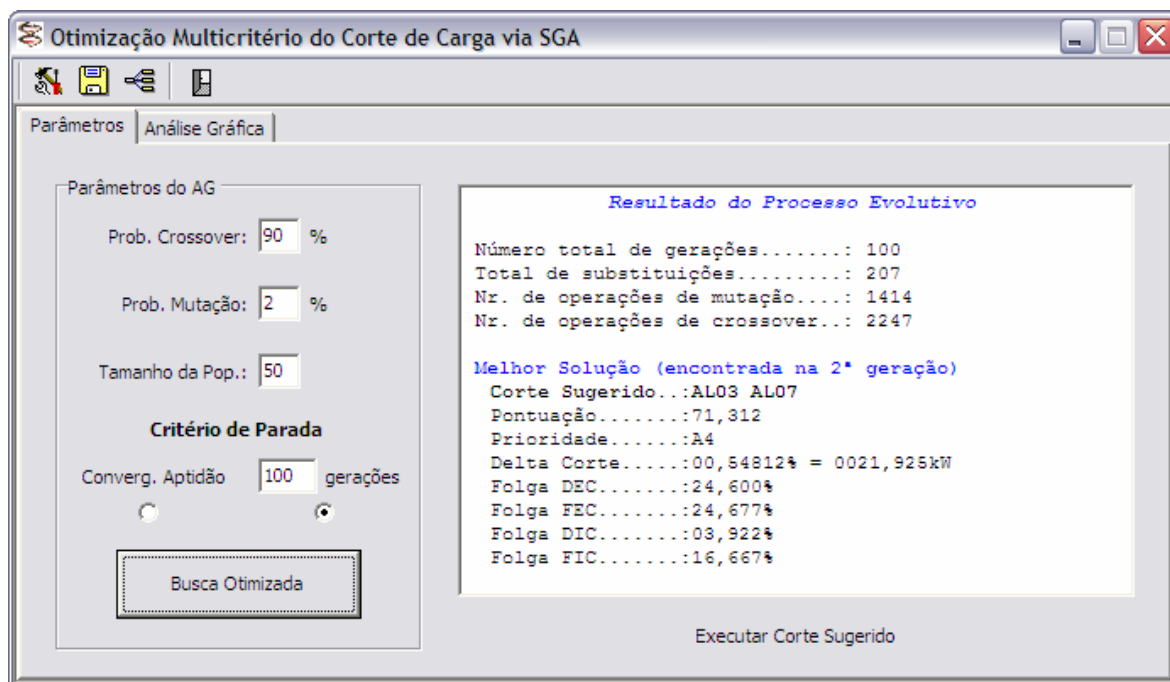


Figura A.19 – Janela para execução da otimização via SGA

Nesse modo de otimização, o usuário também tem a opção de simular a ação de corte de carga sugerido pela busca otimizada, por meio do botão “Executar Corte Sugerido”. Da mesma forma que para o PMOGA, essa ação executa o corte sugerido, indicando na tela de abertura do programa as informações sobre o corte de carga.

Quanto à barra de ferramenta no canto superior da janela, as funções são as mesmas que já foram apresentadas para o PMOGA, segundo a Figura A.16. A única diferença é que o ícone com o símbolo de ferramentas dá acesso a outra janela de configuração do AG, mostrada na Figura A.20. Como pode ser visto nessa figura, para o SGA são inseridas duas novas caixas: a primeira relacionada ao critério de parada por convergência da aptidão, que permite definir o número de repetições da máxima aptidão que causa a convergência, e a segunda que possibilita a escolha do tipo de substituição dos indivíduos a cada geração.

A aba de análise gráfica mostra um gráfico com a pontuação multicritério máxima, atribuída à melhor solução, e a pontuação média de todos os indivíduos da população, ao longo das gerações. Esse gráfico também pode ser salvo em arquivo externo.

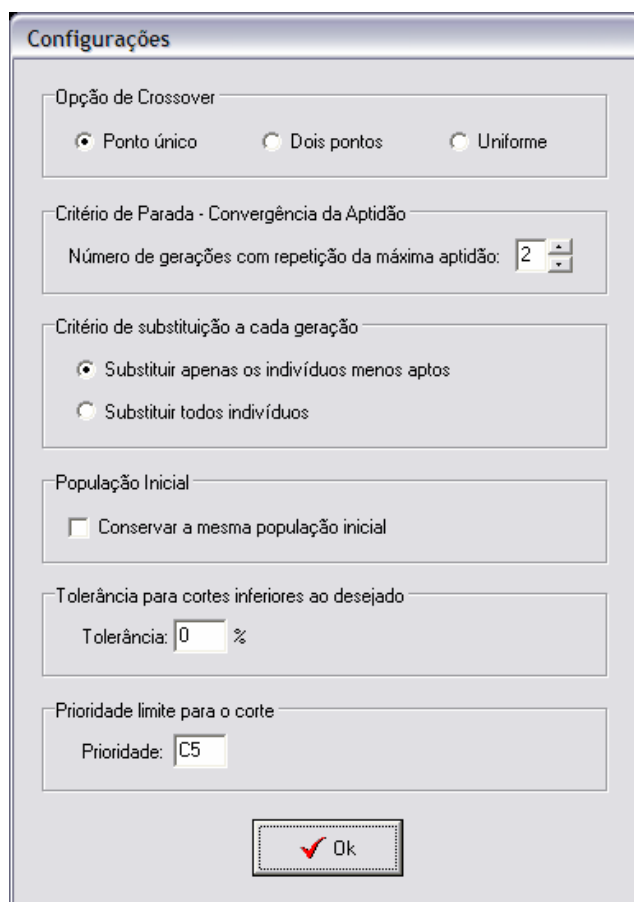


Figura A.20 – Janela com configurações do SGA e da função multicritério

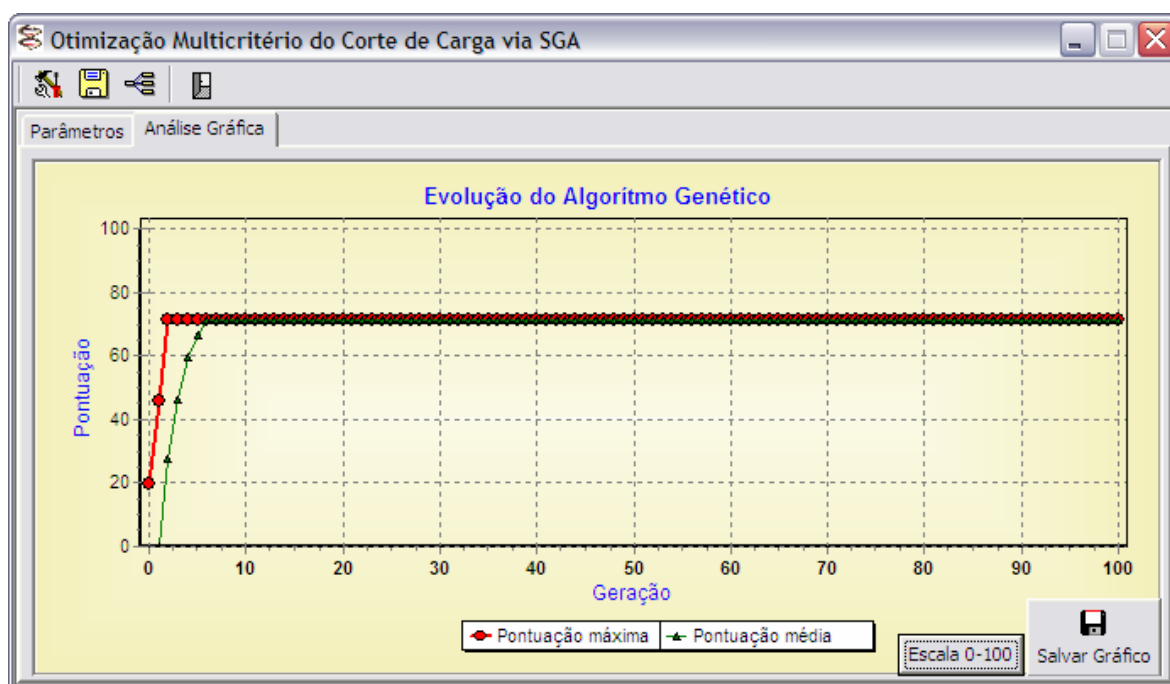


Figura A.21 – Janela de análise gráfica do SGA

Assim, com essas funcionalidades gráficas apresentadas, o programa computacional desenvolvido pode ser utilizado com praticidade para auxiliar nas ações de apoio à decisão de corte de carga, tanto nas etapas de operação quanto planejamento dos sistemas de distribuição.

ANEXO A

Base de Dados Utilizada nas Simulações

- **Subestação: SE-01**

Tensão Base: 23 kV

Número de Alimentadores: 5

DADOS POR ALIMENTADOR:

- **AL01**

Dados dos Trechos					Dados da Barra Final	
Nr.	Barra		Condutor	Comp.[m]	P [kW]	Q [kVAr]
	Inicial	Final				
1	0	1	4/0 CA	305	73,57	14,69
2	1	2	4/0 CA	4100	27,12	17,96
3	2	50	4/0 CA	940	57,91	51,82
4	2	51	4 CA	300	40,42	48,28
5	2	3	4/0 CA	700	34,54	23,61
6	3	49	4 CA	590	62,99	28,89
7	3	4	4/0 CA	1910	29,85	23,56
8	4	48	4 CA	245	77,43	64,27
9	4	5	4/0 CA	2000	12,47	19,20
10	5	6	4/0 CA	20	43,47	20,56
11	6	7	4/0 CA	270	45,00	35,12
12	7	8	4/0 CA	240	26,93	9,19
13	8	9	4/0 CA	150	49,71	37,86
14	9	10	4/0 CA	170	7,10	6,06
15	10	11	4/0 CA	910	52,43	55,56
16	11	12	4/0 CA	750	11,62	6,11
17	12	13	4/0 CA	50	44,08	26,49
18	13	14	4/0 CA	580	69,42	56,73
19	14	15	4/0 CA	500	71,72	31,90
20	15	16	4/0 CA	115	29,75	0,65
21	16	17	4/0 CA	1045	30,00	18,89
22	17	18	4/0 CA	520	58,19	30,11
23	18	19	4/0 CA	2140	75,67	21,20
24	19	20	4/0 CA	240	81,91	72,02
25	20	21	4/0 CA	1080	35,33	19,26
26	21	22	4 CAA	400	54,55	32,73

27	22	23	4 CA	710	67,07	19,07
28	20	24	4 CAA	290	33,65	12,79
29	24	25	4 CAA	300	42,57	45,03
30	19	26	4 CA	440	8,59	9,23
31	18	27	4 CA	1085	41,24	28,94
32	15	28	4 CA	720	62,14	52,31
33	12	29	4 CA	400	31,03	21,13
34	29	30	4 CA	505	60,25	38,49
35	29	31	4 CA	370	25,33	8,84
36	10	32	4 CAA	760	31,38	19,09
37	32	33	4 CAA	280	44,80	19,36
38	33	34	4 CAA	900	57,59	29,85
39	34	35	4 CAA	100	14,42	5,42
40	35	36	4 CA	540	65,92	31,51
41	36	37	4 CA	350	16,91	5,10
42	37	38	2 CA	250	52,04	42,25
43	35	39	4 CA	600	47,15	40,37
44	34	40	4 CA	820	40,61	25,13
45	33	41	4 CA	390	30,15	17,29
46	9	42	4 CA	535	31,21	17,50
47	8	43	4 CA	240	60,45	7,49
48	7	44	2 CA	460	27,44	19,47
49	6	45	2/0 CA	330	75,65	20,76
50	45	46	2/0 CA	360	13,24	3,03
51	5	47	4/0 CA	450	45,00	41,81

- AL02

Dados dos Trechos					Dados da Barra Final	
Nr.	Barra		Condutor	Comp.[m]	P [kW]	Q [kVAr]
	Inicial	Final				
1	0	1	4/0 CA	105	59,41	1,50
2	1	2	4/0 CA	7210	21,78	8,71
3	2	3	4/0 CA	2000	67,84	49,52
4	3	4	4/0 CA	500	16,41	1,70
5	4	37	2 CA	550	58,76	56,16
6	37	38	2 CA	235	54,57	51,30

7	4	5	4/0 CA	210	66,71	17,80
8	5	39	4/0 CA	80	31,27	16,64
9	39	40	4/0 CA	50	43,10	24,35
10	40	41	4/0 CA	190	75,00	50,85
11	41	42	4/0 CA	40	17,12	3,91
12	42	43	4/0 CA	275	79,30	17,18
13	43	44	4/0 CA	50	59,61	14,92
14	44	45	4/0 CA	415	45,47	21,97
15	45	46	4/0 CA	350	81,63	21,22
16	46	47	4/0 CA	900	73,97	21,00
17	47	48	4/0 CA	130	22,77	2,34
18	48	49	4 CA	435	30,00	5,00
19	47	50	4 CA	950	78,93	13,00
20	46	51	4/0 CA	310	24,49	3,45
21	51	52	4/0 CA	700	59,09	20,00
22	52	53	4/0 CA	340	46,41	16,00
23	43	54	4 CA	1130	48,97	25,00
24	42	55	4 CA	845	35,31	18,10
25	41	56	2 CA	1190	12,08	7,23
26	40	57	4 CA	490	25,81	7,13
27	57	58	4 CA	460	18,66	11,32
28	58	59	4 CA	190	40,09	38,44
29	58	60	4 CA	200	17,85	12,19
30	58	61	4 CA	200	14,07	1,06
31	57	62	4 CA	90	39,59	36,10
32	39	63	4 CA	390	38,68	6,67
33	5	6	4/0 CA	400	59,84	14,94
34	6	7	4 CAA	340	8,44	0,92
35	7	36	4 CA	1000	43,69	41,64
36	7	8	4 CAA	200	60,46	24,35
37	8	34	4 CA	120	62,55	7,96
38	34	35	2 CA	300	38,65	13,86
39	8	9	4 CAA	120	57,42	49,52
40	9	33	4 CA	1120	18,86	6,94
41	9	10	4 CAA	320	30,00	5,35
42	10	31	4 CA	450	10,47	17,83
43	31	32	2 CA	540	42,02	21,13

44	10	11	4 CAA	600	44,17	33,90
45	11	30	4 CA	560	37,33	13,44
46	11	12	4 CAA	250	18,66	5,35
47	12	13	4 CA	135	14,91	4,51
48	13	14	4 CA	150	75,00	12,19
49	14	15	4 CA	620	13,52	0,87
50	15	16	4 CA	250	92,40	22,18
51	16	17	4 CA	470	37,46	19,85
52	17	18	4 CA	750	41,71	23,38
53	15	19	4 CA	730	58,28	39,63
54	19	20	4 CA	3145	75,53	24,59
55	14	21	4 CA	330	46,67	31,88
56	12	22	4 CA	700	31,14	17,75
57	22	29	4 CA	1180	71,33	50,76
58	22	23	4 CA	200	69,88	65,36
59	23	27	4 CA	510	32,69	20,73
60	27	28	4 CA	2520	30,45	9,82
61	23	24	4 CA	210	50,18	32,24
62	24	25	4 CA	760	42,72	32,08
63	25	26	4 CA	1090	45,77	34,52

- AL03

Dados dos Trechos					Dados da Barra Final	
Nr.	Barra		Condutor	Comp.[m]	P [kW]	Q [kVAr]
	Inicial	Final				
1	0	1	4/0 CA	540	76,91	16,98
2	1	2	4/0 CA	1200	47,87	34,75
3	2	104	4 CA	630	55,58	36,13
4	2	3	4/0 CA	250	14,30	3,56
5	3	103	4 CA	840	28,59	30,96
6	3	4	4/0 CA	650	47,37	11,72
7	4	99	4 CA	450	41,24	34,34
8	99	100	4 CA	480	60,00	43,62
9	100	101	4 CA	50	15,00	6,17
10	101	102	4 CA	70	51,00	30,21
11	4	5	4/0 CA	430	29,12	6,74

12	5	6	4/0 CA	240	35,45	18,85
13	6	97	4 CA	670	14,19	12,23
14	97	98	4 CA	300	18,29	4,76
15	6	7	4/0 CA	690	72,62	27,29
16	7	96	4 CA	520	47,59	26,52
17	7	8	4/0 CA	270	15,00	4,50
18	8	95	4 CA	995	75,83	7,07
19	8	9	4/0 CA	135	42,41	50,09
20	9	87	4 CA	100	41,24	25,15
21	87	88	4 CA	1300	12,87	5,00
22	88	89	4 CA	680	64,84	7,13
23	89	90	4 CAA	1700	45,00	27,85
24	87	91	4 CA	1200	78,00	24,33
25	91	92	4 CA	85	26,18	8,70
26	87	93	4 CA	380	5,61	7,15
27	93	94	4 CA	520	55,00	32,54
28	9	10	4/0 CA	490	52,81	51,82
29	10	86	4 CA	650	62,10	49,89
30	10	11	4/0 CA	490	30,86	15,98
31	11	76	2 CA	495	11,14	13,41
32	11	77	4 CA	270	66,14	60,79
33	77	78	4 CA	160	21,62	7,55
34	78	79	4 CA	610	73,38	16,47
35	79	80	4 CA	170	31,64	18,02
36	79	81	4 CAA	400	76,88	30,81
37	78	82	4 CA	275	64,27	33,99
38	82	83	4 CA	200	31,31	14,35
39	77	84	4 CA	800	82,26	85,49
40	84	85	4 CA	475	45,40	33,85
41	11	12	4/0 CA	70	53,89	33,27
42	12	13	4/0 CA	500	29,16	15,20
43	13	343	4 CA	615	44,98	20,92
44	13	14	4/0 CA	170	41,09	22,46
45	14	74	4 CA	210	59,74	20,55
46	74	75	4 CA	470	13,49	4,56
47	14	15	4/0 CA	320	20,83	25,53
48	15	16	4/0 CA	650	41,95	14,77

49	16	73	4 CA	430	51,86	43,25
50	16	17	4/0 CA	420	50,04	41,90
51	17	72	4 CA	1050	15,70	17,13
52	17	18	4/0 CA	260	18,71	16,67
53	18	19	4/0 CA	120	60,00	23,66
54	19	20	4/0 CA	1030	60,21	49,08
55	20	21	4/0 CA	140	18,08	22,08
56	21	71	4 CA	500	18,45	6,44
57	21	22	4 CA	600	13,10	20,29
58	22	70	4 CA	450	14,76	11,42
59	22	23	4/0 CA	450	10,92	0,20
60	23	68	4 CA	720	79,18	36,39
61	68	69	4 CA	345	17,52	5,00
62	23	24	4/0 CA	600	61,88	9,84
63	24	62	4 CA	1920	22,84	5,70
64	62	63	4 CA	1650	54,05	39,77
65	63	64	4 CA	1090	74,95	58,46
66	64	65	4 CA	210	13,63	1,31
67	62	66	4 CA	400	30,00	15,47
68	66	67	4 CA	580	15,68	5,10
69	24	25	4/0 CA	1770	43,51	42,79
70	25	58	4 CA	100	32,34	15,27
71	58	59	4 CA	3250	12,53	5,27
72	59	60	4 CA	1800	59,94	47,36
73	58	61	4 CA	1492	73,56	11,48
74	25	26	4/0 CA	370	78,28	62,77
75	26	57	2 CA	930	27,01	16,02
76	26	27	4/0 CA	740	40,70	21,24
77	27	50	4 CA	180	54,78	60,87
78	50	51	4 CA	445	13,88	1,85
79	51	52	4 CA	445	30,00	21,71
80	52	53	4 CA	60	45,74	25,75
81	52	54	4 CA	635	76,30	27,47
82	51	55	4 CA	860	51,98	27,91
83	50	56	4 CA	570	15,63	1,16
84	27	28	4/0 CA	220	79,09	70,83
85	28	41	4 CA	925	33,18	11,03

86	41	42	4 CA	220	61,12	40,64
87	42	43	4 CA	90	16,10	7,41
88	43	44	4 CA	80	61,41	44,02
89	44	45	4 CA	90	24,49	14,92
90	44	46	4 CA	840	75,40	62,89
91	28	47	4 CA	40	28,98	18,52
92	47	48	4 CA	100	75,43	34,99
93	48	49	4 CA	535	56,11	57,03
94	28	29	4/0 CA	520	75,02	68,72
95	29	30	4/0 CA	100	60,38	9,03
96	30	40	4 CA	660	25,67	7,43
97	30	38	4 CA	350	29,87	23,76
98	38	39	4 CA	850	25,26	4,17
99	30	31	4/0 CA	380	16,60	4,18
100	31	32	4/0 CA	100	58,80	45,80
101	32	33	4/0 CA	55	12,68	7,28
102	33	34	4/0 CA	445	70,13	66,02
103	34	35	4/0 CA	220	61,93	13,17
104	35	36	4 CA	80	18,97	6,31
105	34	37	4 CA	425	19,67	6,15

- AL04

Dados dos Trechos					Dados da Barra Final	
Nr.	Barra		Condutor	Comp.[m]	P [kW]	Q [kVAr]
	Inicial	Final				
1	0	1	4/0 CA	30	13,01	4,03
2	1	2	4/0 CA	1760	6,06	5,64
3	2	3	4/0 CA	5180	75,23	28,56
4	3	4	4/0 CA	800	37,15	16,60
5	4	39	4 CA	190	75,63	21,11
6	4	5	4/0 CA	4710	45,00	32,89
7	5	6	4/0 CA	1550	36,49	27,36
8	6	7	4/0 CA	6630	44,03	34,33
9	7	8	4/0 CA	3430	47,18	46,42
10	8	9	4/0 CA	60	48,80	26,84
11	9	10	4/0 CA	1200	44,38	31,49

12	10	11	4/0 CA	1450	54,16	42,25
13	11	12	4/0 CA	920	75,89	2,26
14	12	13	4/0 CA	545	45,00	22,42
15	13	14	4/0 CA	250	36,54	23,75
16	14	15	4/0 CA	1105	74,68	61,60
17	15	16	4/0 CA	250	31,36	18,37
18	16	17	4 CA	2660	15,00	7,11
19	17	18	4 CA	1000	57,13	69,18
20	18	19	4 CA	800	46,82	17,63
21	19	20	4 CA	1000	67,08	9,45
22	20	21	4 CA	1350	59,37	27,58
23	21	22	4 CA	470	15,00	10,40
24	18	23	4 CA	600	25,18	5,75
25	16	24	4 CA	100	70,73	20,68
26	24	25	4 CA	1600	19,99	5,29
27	14	26	1/0 CA	100	56,46	46,25
28	13	27	4 CA	100	62,40	49,53
29	12	28	4 CA	190	29,44	11,67
30	11	29	4 CA	200	15,00	10,80
31	29	30	4 CA	350	42,29	35,90
32	29	31	2 CA	160	32,61	12,61
33	10	32	4 CA	650	76,52	74,73
34	32	33	4 CA	1130	81,85	13,94
35	33	34	4 CA	1900	59,53	55,34
36	33	35	4 CA	60	30,60	26,94
37	33	36	4 CA	2400	55,11	5,93
38	8	37	4/0 CA	170	16,41	4,83

- AL05

Dados dos Trechos					Dados da Barra Final	
Barra						
Nr.	Inicial	Final	Condutor	Comp.[m]	P [kW]	Q [kVAr]
1	0	1	4/0 CA	70	77,18	32,90
2	1	2	4/0 CA	735	46,73	37,51
3	2	3	4/0 CA	695	63,89	41,23
4	3	4	4/0 CA	4105	45,60	16,90

5	4	47	4 CA	910	62,09	32,09
6	4	5	4/0 CA	1300	16,76	30,06
7	5	6	4/0 CA	965	55,63	30,56
8	6	7	4/0 CA	900	67,93	15,54
9	7	8	4/0 CA	1700	55,09	7,29
10	8	9	4 CAA	15	30,00	17,29
11	9	10	4 CAA	120	62,78	48,97
12	10	11	4 CAA	1440	25,30	9,79
13	11	12	4 CAA	300	44,14	39,69
14	12	13	4 CAA	900	9,70	11,00
15	13	14	4 CAA	250	77,30	19,10
16	14	15	4 CAA	800	1,80	11,97
17	15	16	4 CAA	450	75,00	27,74
18	16	17	4 CAA	700	47,72	14,21
19	17	18	4 CAA	850	41,10	35,30
20	18	19	4 CAA	780	44,91	26,96
21	19	20	4 CAA	180	0,00	3,80
22	20	21	4 CAA	50	60,08	41,64
23	21	22	4 CAA	80	74,00	17,50
24	22	23	4 CAA	40	76,11	10,00
25	23	24	4 CAA	900	56,31	7,18
26	19	25	4 CA	1200	38,46	12,78
27	18	26	4 CA	1550	32,37	14,80
28	26	27	4 CA	150	18,38	6,88
29	27	28	4 CAA	2000	60,66	60,05
30	28	29	4 CAA	3800	10,81	2,16
31	26	31	4 CAA	480	77,77	27,87
32	31	32	4 CAA	960	4,44	1,00
33	14	33	4 CA	1220	69,97	68,18
34	12	34	4 CA	2880	46,93	37,91
35	34	30	4 CAA	400	26,76	20,44
36	11	35	4 CA	3130	12,30	2,00
37	8	36	4/0 CA	2500	71,84	10,94
38	36	37	4/0 CA	300	8,30	6,14
39	37	38	4/0 CA	60	62,70	11,02
40	38	46	4 CA	1290	43,72	27,81
41	38	39	4/0 CA	600	27,06	21,72

42	39	48	4 CA	980	63,46	43,41
43	48	49	4 CA	100	74,69	25,84
44	49	50	4 CA	1000	50,38	38,33
45	48	51	4 CAA	1500	20,78	0,92
46	39	40	4/0 CA	10500	28,18	3,00
47	40	41	4/0 CA	2100	15,03	10,52
48	41	42	4/0 CA	350	57,44	39,36
49	41	43	4/0 CA	2430	4,79	4,79
50	43	44	4/0 CA	480	71,79	9,84
51	43	45	4/0 CA	50	32,30	27,40

- **Subestação: SE-02**

Tensão Base: **23 kV**

Número de Alimentadores: **4**

DADOS POR ALIMENTADOR:

- **AL06**

Dados dos trechos					Dados da Barra Final	
Nr.	Barra		Condutor	Comp.[m]	P [kW]	Q [kVAr]
	Inicial	Final				
1	0	1	4/0 CA	350	60,17	22,31
2	1	66	4 CAA	4290	22,27	7,83
3	1	2	4/0 CA	900	78,28	17,36
4	2	3	4/0 CA	4810	47,73	30,36
5	3	64	4 CAA	500	35,09	19,67
6	64	65	4 CAA	1000	44,99	37,69
7	3	4	4/0 CA	1590	72,73	61,14
8	4	5	4/0 CA	2750	65,33	39,63
9	5	6	4/0 CA	300	75,28	66,75
10	6	59	4 CA	800	28,83	20,48
11	59	60	4 CA	1220	4,09	0,74
12	60	61	4 CA	100	28,24	16,37
13	61	62	4 CA	2400	72,56	11,11
14	61	63	4 CA	2650	37,90	18,25
15	6	7	4/0 CA	910	47,86	18,76

16	7	56	4 CAA	164	5,23	10,77
17	56	57	4 CA	350	52,97	40,38
18	56	58	4 CAA	1235	17,59	3,49
19	7	8	4/0 CA	400	60,00	38,82
20	8	9	4/0 CA	1050	47,70	49,71
21	9	10	4/0 CA	160	72,06	68,66
22	10	11	1/0 CA	350	13,03	7,09
23	11	12	1/0 CA	1160	69,32	61,09
24	12	13	4/0 CA	235	20,00	3,00
25	13	14	1/0 CA	510	15,50	2,66
26	14	15	1/0 CA	1100	32,82	20,02
27	15	16	1/0 CA	200	12,17	2,29
28	16	17	1/0 CA	320	15,00	8,18
29	17	18	1/0 CA	80	62,24	54,99
30	18	19	1/0 CA	1620	31,34	13,86
31	19	20	1/0 CA	1080	68,66	51,40
32	20	21	1/0 CA	900	19,16	2,97
33	21	22	4 CA	1600	24,78	4,00
34	21	23	4 CAA	1300	67,64	57,37
35	20	24	4 CA	990	8,91	1,12
36	19	25	4 CA	1115	45,00	30,79
37	18	26	4 CA	920	43,97	19,79
38	26	27	4 CA	2080	65,16	58,13
39	27	28	4 CA	2070	44,07	11,54
40	28	29	4 CA	1790	60,80	7,07
41	29	30	4 CA	1300	70,38	53,24
42	29	31	4 CA	4110	72,97	27,06
43	27	32	4 CA	2260	92,49	13,87
44	16	33	1/0 CA	270	39,91	26,15
45	33	34	4 CA	2010	75,57	72,25
46	34	35	4 CA	1100	71,48	26,48
47	35	36	4 CA	3400	75,00	64,61
48	35	37	4 CA	1270	9,65	1,93
49	15	38	4 CAA	1720	66,58	53,23
50	11	53	4 CA	850	72,81	19,45
51	53	54	4 CA	2020	58,99	39,47
52	54	55	4 CA	1140	24,65	9,62

53	10	39	1/0 CAA	525	45,07	30,27
54	39	40	4 CAA	1265	75,22	16,85
55	10	41	4/0 CAA	300	28,71	11,47
56	41	42	4/0 CAA	1620	30,03	12,12
57	42	43	4/0 CAA	1590	29,04	11,34
58	43	44	4 CA	815	31,53	14,85
59	44	45	4 CA	1375	75,00	16,25
60	45	46	4 CA	280	68,95	46,69
61	46	47	4 CA	2550	33,11	16,15
62	44	48	4 CA	1300	75,35	7,80
63	48	49	4 CA	1200	38,60	26,63
64	43	50	4 CA	870	38,34	13,19
65	50	51	4 CA	2580	71,06	21,38
66	50	52	4 CA	2570	46,35	34,82

- AL07

Dados dos Trechos					Dados da Barra Final	
Nr.	Barra		Condutor	Comp.[m]	P [kW]	Q [kVAr]
	Inicial	Final				
1	0	1	4/0 CA	200	23,61	22,49
2	1	2	4/0 CA	100	45,00	29,78
3	2	3	4/0 CA	290	15,00	16,64
4	3	4	4/0 CA	1000	52,26	49,57
5	4	5	4/0 CA	2000	84,74	81,31
6	5	6	4/0 CA	800	38,43	36,73
7	6	7	4/0 CA	300	41,54	15,90
8	7	8	4/0 CA	800	36,38	17,50
9	8	9	4/0 CA	250	15,29	2,43
10	9	10	4/0 CA	150	48,64	45,00
11	10	11	4/0 CA	450	46,36	27,20
12	11	12	4/0 CA	500	78,08	26,94
13	12	13	4/0 CA	160	9,51	4,00
14	13	14	4/0 CA	350	57,48	52,22
15	14	15	4/0 CA	1140	40,53	26,75
16	15	16	1/0 CA	1610	9,18	15,67
17	16	17	1/0 CA	200	14,91	3,90

18	17	18	1/0 CA	400	62,64	60,76
19	18	19	1/0 CA	1530	60,33	46,79
20	19	20	1/0 CA	1000	13,13	5,78
21	20	21	1/0 CA	900	10,72	1,82
22	21	53	4 CAA	1300	36,92	19,33
23	21	54	4 CA	1300	27,50	5,63
24	20	52	4 CA	1550	74,21	27,38
25	19	51	4 CA	2390	12,38	4,46
26	18	47	4 CA	2800	56,00	10,18
27	47	48	4 CA	2030	13,95	3,00
28	48	49	4 CA	500	49,31	28,44
29	48	50	4 CA	5300	60,00	47,10
30	17	41	1/0 CA	270	18,97	6,00
31	41	42	4 CA	1510	72,00	74,94
32	42	43	4 CA	1200	44,05	22,70
33	42	44	4 CA	5400	38,67	38,29
34	41	45	1/0 CA	730	62,88	68,68
35	45	46	1/0 CA	900	41,21	20,29
36	16	40	4 CA	450	71,76	35,38
37	14	37	4 CA	930	57,10	47,78
38	37	38	4 CA	550	13,19	0,85
39	37	39	4 CA	2470	52,75	36,86
40	13	28	1/0 CA	90	18,23	10,16
41	28	29	4 CA	1150	55,70	40,66
42	13	30	4/0 CA	900	31,43	21,07
43	30	31	4 CA	720	38,52	17,53
44	30	32	4/0 CA	1780	20,40	4,07
45	32	33	4 CA	1950	43,41	17,31
46	33	34	4 CA	2080	73,98	23,11
47	32	35	4 CA	3430	25,67	7,21
48	32	36	4 CA	4700	76,91	19,00
49	8	27	4 CA	1450	10,93	6,35
50	7	24	4 CA	1100	61,90	59,24
51	24	25	4 CA	2400	38,10	18,85
52	24	26	4 CA	2550	17,63	7,51
53	2	23	4 CA	1850	13,63	2,00
54	1	22	4 CA	4150	78,82	20,94

• AL08

Dados dos trechos					Dados da Barra Final	
Nr.	Barra		Condutor	Comp.[m]	P [kW]	Q [kVAr]
	Inicial	Final				
1	0	1	1/0 CA	100	83,22	35,23
2	1	2	1/0 CA	700	28,84	29,74
3	2	102	1/0 CA	1200	15,00	15,78
4	102	103	1/0 CA	490	23,05	11,63
5	103	104	4 CAA	1380	46,97	33,68
6	104	105	4 CAA	80	13,90	7,09
7	105	106	4 CAA	150	28,47	8,92
8	106	107	4 CAA	385	74,98	19,43
9	107	108	4 CA	960	72,50	58,27
10	108	109	4 CA	40	60,00	12,34
11	109	110	4 CA	250	57,89	36,03
12	110	111	4 CA	910	59,00	52,23
13	111	112	4 CA	1890	82,92	69,28
14	112	113	4 CA	80	37,49	32,75
15	113	114	4 CA	180	60,09	44,65
16	114	115	4 CA	560	17,12	6,83
17	115	116	4 CA	460	74,45	56,34
18	116	117	4 CA	570	18,62	2,31
19	112	118	4 CA	200	15,44	4,88
20	111	119	4 CA	1760	48,08	32,78
21	110	120	2 CA	1070	25,46	13,19
22	2	3	1/0 CA	1400	44,48	36,26
23	3	97	4 CA	2380	62,77	45,09
24	97	98	4 CA	700	12,22	3,82
25	98	99	4 CA	660	40,14	9,78
26	97	100	4 CA	1140	68,98	14,84
27	100	101	4 CA	600	22,07	4,34
28	3	4	1/0 CA	150	28,01	17,51
29	4	94	4 CA	570	36,90	22,66
30	94	95	4 CA	860	48,04	35,15
31	95	96	4 CA	2890	60,92	56,98
32	4	5	1/0 CA	1350	45,00	35,25
33	5	87	4 CA	150	74,29	62,48

34	87	88	4 CA	450	63,63	6,36
35	88	89	4 CA	2500	30,80	9,72
36	89	90	4 CA	340	42,83	32,17
37	90	91	4 CA	1500	29,99	16,48
38	91	93	4 CAA	1170	76,40	10,19
39	91	92	4 CA	2150	42,01	19,01
40	5	6	1/0 CA	2300	14,43	10,89
41	6	83	4 CA	800	27,60	10,26
42	83	84	4 CA	380	31,06	10,77
43	84	85	4 CA	700	71,06	72,48
44	85	86	4 CA	1100	29,35	24,47
45	6	7	1/0 CA	1030	55,26	36,40
46	7	76	4 CA	60	31,47	15,17
47	76	77	4 CA	630	17,15	12,35
48	77	78	4 CA	600	16,21	11,33
49	78	79	4 CA	1740	76,63	66,00
50	79	80	4 CA	1050	30,00	21,39
51	80	81	4 CA	850	33,89	27,66
52	81	82	4 CA	4500	14,98	9,75
53	7	8	1/0 CA	120	75,00	67,59
54	8	9	1/0 CA	770	31,72	31,72
55	9	10	1/0 CA	900	44,90	30,81
56	10	37	4 CA	510	43,13	18,55
57	37	38	4 CA	780	37,59	33,17
58	38	39	4 CA	40	73,93	47,34
59	39	40	4 CA	600	60,77	57,34
60	40	41	4 CA	96	55,54	41,93
61	41	42	4 CA	1500	83,40	13,89
62	42	43	4 CA	1110	80,39	20,81
63	43	44	4 CA	1400	32,74	19,20
64	44	45	4 CA	940	20,55	15,45
65	45	46	4 CA	1450	74,18	32,96
66	46	47	4 CA	4580	33,88	1,36
67	47	48	4 CA	800	41,70	36,03
68	48	49	4 CA	1680	12,70	3,00
69	48	50	4 CA	3290	73,27	78,49
70	47	51	4 CA	1520	61,22	44,05

71	46	52	4 CA	1490	31,63	16,47
72	45	53	4 CA	1150	61,08	46,55
73	44	54	4 CAA	300	63,80	53,22
74	54	55	4 CAA	1270	16,00	5,27
75	44	56	4 CAA	600	19,08	13,74
76	56	57	4 CAA	2780	60,00	38,55
77	43	58	4 CA	450	13,56	18,53
78	42	59	4 CA	780	44,41	23,28
79	41	60	4 CA	840	35,68	16,89
80	38	61	4 CA	390	75,61	64,21
81	61	62	4 CA	100	36,23	7,00
82	62	63	4 CA	600	45,00	32,99
83	63	64	4 CA	1100	16,59	5,80
84	64	65	4 CA	790	2,67	1,97
85	65	66	4 CA	100	30,84	16,73
86	66	67	4 CA	40	35,33	18,47
87	67	68	4 CA	880	69,66	26,22
88	68	69	4 CA	2010	41,46	19,07
89	69	70	4 CA	920	62,67	5,26
90	68	71	4 CA	950	53,60	27,87
91	71	72	4 CA	1800	16,04	8,00
92	65	73	4 CA	3980	65,11	51,97
93	65	74	4 CA	1540	37,57	33,97
94	63	75	4 CAA	2980	14,18	5,00
95	10	11	1/0 CA	790	43,39	46,47
96	11	12	1/0 CA	4250	77,65	67,54
97	12	13	1/0 CA	1000	28,79	20,66
98	13	14	1/0 CA	150	80,87	64,00
99	14	28	4 CA	2950	48,51	31,79
100	28	29	4 CA	300	52,23	32,27
101	29	30	4 CA	2000	14,35	13,75
102	30	31	4 CA	1650	74,74	64,73
103	31	32	4 CA	1200	43,19	32,11
104	32	33	4 CA	400	21,85	4,98
105	33	34	4 CA	4590	30,20	15,84
106	34	35	4 CA	950	60,00	43,79
107	35	36	4 CA	1160	17,12	6,00

108	14	15	1/0 CA	4600	23,00	12,00
109	15	19	4 CA	1740	79,90	22,72
110	19	20	4 CA	210	68,97	54,41
111	20	21	4 CA	3800	42,43	34,14
112	15	22	4 CA	1300	73,86	74,24
113	22	23	4 CA	1050	39,98	31,36
114	23	24	4 CA	2620	60,00	51,59
115	15	16	1/0 CA	2330	57,55	52,31
116	16	25	4 CA	690	56,17	32,13
117	25	26	4 CA	440	50,34	47,13
118	26	27	4 CA	1590	34,11	6,91
119	16	17	1/0 CA	980	9,48	3,00
120	17	18	1/0 CA	430	45,92	34,05

- AL09

Dados dos Trechos					Dados da Barra Final	
Nr.	Barra		Condutor	Comp.[m]	P [kW]	Q [kVAr]
	Inicial	Final				
1	0	1	1/0 CAA	10	23,10	14,00
2	1	2	1/0 CAA	4810	16,32	1,28
3	2	3	1/0 CAA	3190	15,00	6,86
4	3	4	1/0 CAA	1200	11,66	4,20
5	4	5	1/0 CAA	1125	75,00	72,04
6	5	6	1/0 CAA	1300	40,00	23,97
7	6	7	1/0 CAA	650	15,06	10,30
8	7	8	1/0 CAA	2300	20,00	3,00
9	8	9	1/0 CAA	300	30,00	21,00
10	9	10	1/0 CAA	40	35,00	12,00
11	10	11	1/0 CAA	2730	40,00	14,00
12	11	12	1/0 CAA	1320	10,00	5,44
13	12	13	1/0 CAA	730	20,00	2,00
14	13	14	1/0 CAA	150	30,00	10,59
15	14	15	4 CA	4850	30,00	10,00
16	15	16	4 CA	1600	16,12	2,00
17	16	17	4 CA	310	30,00	7,37
18	17	18	4 CA	3135	13,05	17,94

19	18	78	4 CA	100	30,00	5,00
20	78	79	4 CA	2080	35,00	6,48
21	79	80	4 CA	650	40,00	13,00
22	80	81	4 CA	3180	30,00	23,00
23	81	82	4 CA	1850	40,00	21,00
24	81	83	4 CA	1800	30,21	15,13
25	83	84	4 CA	3350	20,00	7,00
26	84	85	4 CA	6700	50,00	12,72
27	83	86	4 CA	300	25,00	12,00
28	86	87	4 CA	4550	36,35	21,00
29	80	88	4 CA	400	20,86	4,76
30	88	89	4 CA	4950	48,08	20,00
31	18	19	4 CA	3950	32,95	18,33
32	19	20	4 CA	1350	12,65	7,63
33	20	21	4 CA	1600	20,00	3,00
34	21	72	4 CA	2850	40,00	12,00
35	72	73	4 CA	1900	44,88	12,72
36	73	74	4 CA	4200	17,76	9,70
37	21	22	4 CA	1050	45,00	16,00
38	22	23	4 CA	1535	20,00	2,00
39	23	76	4 CA	1150	30,25	27,03
40	23	77	4 CA	1800	13,66	6,59
41	17	24	4 CA	1340	25,15	8,80
42	16	25	4 CAA	4410	12,33	9,87
43	13	26	4 CA	6120	49,12	25,38
44	12	27	4 CA	5320	20,00	4,00
45	9	28	4 CA	4860	40,00	13,00
46	6	32	4 CAA	200	30,00	7,64
47	32	33	4 CAA	5960	29,67	7,18
48	5	29	4 CA	910	31,75	19,68
49	29	30	4 CAA	80	22,89	22,67
50	29	31	4 CAA	800	40,00	4,00
51	3	34	1/0 CA	100	15,72	2,64
52	2	35	4 CA	730	20,00	3,00
53	35	36	4 CA	350	47,17	26,20
54	36	37	4 CA	2500	12,62	3,00
55	37	38	4 CA	1540	23,32	21,45

56	38	39	4 CA	800	53,33	20,00
57	39	40	4 CA	1350	50,00	14,00
58	39	41	4 CA	1170	46,17	21,00
59	37	42	4 CA	550	46,13	14,00
60	42	43	4 CA	3400	43,91	21,08

- **Subestação: SE-03**

Tensão Base: 23 kV

Número de Alimentadores: 3

DADOS POR ALIMENTADOR:

- **AL10**

Dados dos Trechos					Dados da Barra Final	
Nr.	Barra		Condutor	Comp.[m]	P [kW]	Q [kVAr]
	Inicial	Final				
1	0	1	4/0 CA	4110	15,00	10,44
2	1	2	4/0 CAA	230	50,76	47,33
3	2	69	4 CA	350	14,25	6,00
4	69	70	4 CAA	1610	76,99	17,64
5	70	71	4 CAA	1775	30,00	13,00
6	71	72	4 CAA	580	71,24	22,25
7	72	73	4 CAA	725	13,43	3,42
8	73	74	4 CA	1100	28,41	14,79
9	74	75	4 CA	800	77,99	73,59
10	75	76	4 CA	1180	15,00	7,83
11	76	77	336,4 CA	1900	31,08	13,70
12	77	78	4 CA	1640	30,18	12,50
13	2	3	336,4 CA	550	23,88	4,01
14	3	59	4 CA	400	41,89	32,62
15	59	60	4 CA	240	55,82	29,33
16	60	61	4 CAA	1935	79,55	13,72
17	61	62	4 CAA	150	58,82	33,82
18	62	63	4 CAA	1830	76,15	24,48
19	63	64	4 CAA	2200	57,41	43,18
20	64	65	4 CAA	8530	11,33	6,11

21	63	66	4 CAA	1530	70,55	59,92
22	61	67	4 CAA	1700	58,16	33,85
23	67	68	4 CAA	5360	21,09	5,04
24	3	4	4/0 CA	580	44,16	20,99
25	4	57	2 CA	510	40,60	43,28
26	57	58	4 CAA	895	45,29	19,39
27	4	5	4/0 CA	630	75,65	67,86
28	5	6	4/0 CA	800	72,66	66,07
29	6	55	4 CA	550	47,18	11,31
30	55	56	4 CAA	2200	59,13	38,52
31	6	7	4/0 CA	1370	28,31	15,67
32	7	8	4/0 CA	590	16,23	3,61
33	8	9	4/0 CA	610	21,80	8,35
34	9	10	4/0 CA	660	22,71	4,33
35	10	11	4/0 CA	270	71,93	21,49
36	11	12	4/0 CAA	400	12,86	3,00
37	12	13	4/0 CA	430	46,10	32,21
38	13	14	4/0 CA	660	71,10	11,23
39	14	15	4/0 CA	990	46,07	42,03
40	15	16	4/0 CA	480	75,00	51,71
41	16	17	4/0 CA	1980	73,00	68,62
42	17	18	4/0 CA	1110	44,84	27,11
43	18	19	4/0 CA	450	15,89	13,85
44	19	20	4/0 CA	80	14,11	5,00
45	20	21	4/0 CA	100	14,30	12,73
46	21	22	4/0 CA	605	29,53	15,57
47	22	23	4/0 CA	330	43,37	30,33
48	23	24	4/0 CA	2270	26,82	6,14
49	23	25	4 CA	670	46,79	40,71
50	22	26	4 CA	990	77,71	9,10
51	22	27	4 CA	170	28,36	17,99
52	27	28	4 CA	340	68,18	44,55
53	18	29	4 CA	120	10,39	10,07
54	29	30	4 CA	1180	23,71	6,45
55	16	31	4 CA	1240	70,96	68,13
56	31	32	4 CA	770	45,51	33,41
57	32	33	4 CA	2235	9,29	3,00

58	13	34	4 CA	375	60,04	41,41
59	12	35	4 CA	495	61,62	46,31
60	11	36	4/0 CA	660	45,00	30,65
61	36	37	4 CA	700	72,39	11,12
62	36	38	4/0 CA	1910	41,35	47,23
63	38	39	4/0 CA	1230	45,98	18,04
64	39	40	4/0 CA	150	45,00	37,89
65	40	41	4/0 CA	430	56,98	31,52
66	41	42	4 CA	1770	14,35	10,09
67	42	43	4 CA	920	65,80	51,61
68	43	44	4 CA	1830	30,00	13,17
69	44	45	4 CA	550	60,29	45,37
70	41	46	4/0 CA	1190	26,90	18,02
71	46	47	4/0 CA	1050	45,56	29,56
72	47	48	4 CA	2470	24,59	13,44
73	46	49	4 CA	1250	73,31	65,02
74	39	50	4 CA	1630	43,04	38,54
75	38	51	4 CAA	1020	31,37	22,58
76	10	52	4 CA	370	74,29	26,74
77	9	53	4 CAA	1190	72,54	68,79
78	8	54	4 CA	720	27,18	17,80

- AL11

Dados dos Trechos					Dados da Barra Final	
Nr.	Barra		Condutor	Comp.[m]	P [kW]	Q [kVAr]
	Inicial	Final				
1	0	1	4/0 CAA	2975	31,07	13,55
2	1	2	4/0 CAA	2280	14,32	6,00
3	2	3	4/0 CAA	320	25,26	17,87
4	3	4	4/0 CAA	180	31,51	15,26
5	4	5	4/0 CAA	260	18,71	8,00
6	5	6	4/0 CAA	1090	75,71	12,22
7	6	7	4/0 CAA	910	41,04	33,47
8	7	8	4/0 CAA	540	23,14	13,54
9	8	9	4/0 CAA	3490	58,80	44,22
10	9	10	4 CAA	100	19,86	16,40

11	10	11	4 CAA	1100	17,56	4,12
12	11	12	4 CAA	750	59,73	11,86
13	12	13	4 CAA	1245	44,80	31,89
14	9	14	4 CAA	400	45,00	27,35
15	14	15	4 CAA	1080	74,14	12,21
16	14	16	4 CAA	3050	15,00	3,26
17	8	17	4/0 CAA	460	59,99	43,79
18	17	18	4/0 CAA	1100	72,03	15,85
19	7	19	4 CAA	1280	12,31	2,00
20	19	20	4 CA	780	58,16	62,74
21	5	21	4 CA	1450	42,26	32,42

- AL12

Dados dos Trechos					Dados da Barra Final	
Nr.	Barra		Condutor	Comp.[m]	P [kW]	Q [kVAr]
	Inicial	Final				
1	0	1	4/0 CAA	1240	17,37	14,34
2	1	2	4/0 CAA	1110	13,75	5,00
3	2	3	4/0 CAA	350	53,77	24,74
4	3	4	4/0 CAA	100	47,80	52,01
5	4	5	4/0 CAA	1130	90,22	83,23
6	5	6	4/0 CAA	1700	66,55	25,30
7	6	7	4/0 CAA	1040	49,58	40,66
8	7	8	4/0 CAA	700	31,07	19,64
9	8	9	4/0 CAA	980	45,74	23,27
10	9	10	4/0 CAA	400	31,16	15,70
11	10	11	4/0 CAA	20	60,82	51,06
12	11	12	4/0 CAA	660	16,95	7,37
13	12	13	4/0 CAA	1150	64,55	37,98
14	13	14	4/0 CAA	600	76,07	16,55
15	14	15	4/0 CAA	1300	74,56	63,54
16	15	16	336,4 CAA	1250	16,74	9,62
17	14	17	4 CA	3590	41,44	17,35
18	13	18	4 CAA	580	15,00	4,78
19	18	19	4 CA	760	76,96	76,55

20	13	20	4 CAA	1020	56,68	54,26
21	20	21	4 CAA	2380	69,85	4,98
22	21	22	4 CAA	2870	60,00	51,49
23	22	23	4 CAA	2150	59,55	56,76
24	12	24	4 CA	720	60,19	54,34
25	11	25	4 CAA	230	45,00	21,85
26	10	26	4 CAA	230	35,77	18,03
27	9	27	4 CAA	100	75,00	64,98
28	27	28	4 CAA	320	18,10	11,65
29	28	29	4 CAA	905	54,19	35,63
30	8	30	4 CA	290	3,73	8,19
31	30	31	4 CAA	3600	67,73	58,26
32	7	32	4 CAA	320	35,24	33,61
33	5	33	4 CAA	460	52,11	51,44
34	33	34	4 CAA	1350	46,88	38,24
35	34	35	4 CAA	1600	8,87	5,20
36	3	36	4 CAA	1180	45,75	43,02
37	36	37	4 CAA	1980	40,12	31,31
38	2	38	1/0 CA	440	29,70	21,22
39	38	39	1/0 CA	65	64,14	24,92
40	39	40	1/0 CA	920	45,00	33,74
41	40	41	1/0 CA	400	30,53	20,09
42	41	42	1/0 CA	450	43,36	41,71
43	42	43	4 CAA	490	29,37	14,47
44	42	44	4 CAA	410	71,16	64,36
45	44	45	4 CAA	1370	59,35	38,84
46	45	46	4 CAA	2400	57,16	47,44
47	45	47	4 CA	490	73,72	11,92
48	44	48	4 CA	660	25,10	16,25

- **Subestação: SE-04**

Tensão Base: 23 kV

Número de Alimentadores: 2

DADOS POR ALIMENTADOR:

- **AL13**

Dados dos Trechos					Dados da Barra Final	
Nr.	Barra		Condutor	Comp.[m]	P [kW]	Q [kVAr]
	Inicial	Final				
1	0	1	4/0 CA	1595	46,22	44,84
2	1	2	4/0 CA	230	45,15	30,93
3	2	86	4 CA	985	83,91	79,21
4	2	3	4/0 CA	1665	21,19	7,93
5	3	4	4/0 CA	2560	69,10	58,04
6	4	5	4/0 CA	4060	30,90	25,20
7	5	6	4/0 CA	1595	70,44	50,21
8	6	7	4/0 CA	1340	76,70	17,16
9	7	85	4 CA	1370	89,48	74,72
10	7	8	4/0 CA	2350	65,48	60,35
11	8	84	4 CA	2020	59,00	43,30
12	8	9	4/0 CA	670	15,71	11,03
13	9	61	1/0 CA	420	13,32	2,00
14	61	62	4 CA	670	44,72	44,98
15	62	63	4 CA	400	29,07	15,48
16	63	64	4 CA	340	75,11	18,24
17	64	65	4 CA	50	15,49	7,12
18	65	66	4 CA	390	75,70	10,48
19	66	67	4 CA	1000	43,35	19,77
20	67	68	4 CA	2450	45,00	36,03
21	68	69	4 CA	3550	28,94	8,02
22	69	70	4 CA	2900	75,00	19,56
23	70	71	4 CA	1850	30,34	2,73
24	69	72	4 CA	1100	59,06	53,74
25	67	73	4 CA	4095	75,00	58,76
26	65	74	4 CA	1530	60,73	57,25

27	74	75	4 CA	460	30,47	7,94
28	74	76	4 CA	2490	58,39	56,26
29	76	77	4 CA	100	13,31	6,00
30	77	78	4 CA	4745	45,15	42,52
31	76	79	4 CA	2150	21,38	4,29
32	79	80	4 CA	550	24,77	17,36
33	80	81	4 CA	1875	13,27	3,44
34	63	82	4 CA	350	75,00	9,20
35	82	83	4 CA	1730	31,76	12,41
36	9	10	4/0 CA	2690	60,00	9,72
37	10	60	4 CA	6630	57,27	54,03
38	10	11	4/0 CA	620	75,00	16,55
39	11	59	4 CAA	2110	31,18	7,20
40	11	12	4/0 CA	5100	7,35	2,13
41	12	58	1/0 CA	1950	73,80	74,19
42	12	13	4/0 CA	1105	49,21	35,70
43	13	56	1/0 CA	1320	46,14	28,57
44	56	57	1/0 CA	645	35,56	7,46
45	13	14	4/0 CA	1000	70,67	6,02
46	14	15	4/0 CA	1120	14,72	5,17
47	15	16	4/0 CA	400	49,95	44,49
48	16	45	4 CA	400	15,00	5,27
49	16	46	1/0 CA	840	48,69	53,03
50	46	47	1/0 CA	100	70,79	48,17
51	47	48	4 CA	645	30,01	11,42
52	48	49	6 CA	840	34,70	14,92
53	49	50	4 CA	1250	6,43	7,51
54	50	51	4 CA	1740	67,62	62,59
55	50	52	4 CA	500	41,30	36,69
56	46	53	4 CA	1235	22,64	3,00
57	53	54	4 CA	940	68,43	18,82
58	54	55	4 CA	1630	31,54	12,27
59	16	17	1/0 CA	505	76,00	19,62
60	17	43	4 CA	550	49,22	20,10
61	43	44	4 CA	440	19,28	14,72
62	17	18	1/0 CA	330	15,29	6,00
63	18	38	1/0 CA	2270	75,07	10,43

64	38	39	1/0 CA	1140	72,21	58,85
65	39	40	1/0 CA	815	50,68	42,42
66	39	41	4 CA	7600	49,98	33,15
67	38	42	4 CA	560	15,38	3,44
68	18	19	4 CA	700	75,19	4,37
69	19	20	1/0 CA	650	76,03	22,60
70	20	34	4 CAA	1640	43,67	19,00
71	34	35	4 CA	290	75,81	10,07
72	35	36	4 CA	3400	60,00	51,10
73	36	37	4 CA	4740	32,48	11,04
74	20	21	1/0 CA	200	3,29	1,15
75	21	33	2 CA	1015	15,35	4,69
76	21	22	1/0 CA	150	68,81	15,14
77	22	23	1/0 CA	200	75,00	7,54
78	23	24	1/0 CA	60	77,54	8,96
79	24	25	1/0 CA	400	73,10	30,00
80	25	26	1/0 CA	840	80,23	20,00
81	26	27	1/0 CA	2930	82,39	30,00
82	27	28	1/0 CA	250	50,55	42,49
83	28	29	1/0 CA	2485	78,51	76,16
84	29	30	1/0 CA	2300	31,01	15,26
85	28	31	1/0 CA	1560	30,21	3,66
86	25	32	2 CA	1100	28,55	20,25

- AL14

Dados dos Trechos					Dados da Barra Final	
Nr.	Barra		Condutor	Comp.[m]	P [kW]	Q [kVAr]
	Inicial	Final				
1	0	1	4/0 CAA	1	30,00	24,95
2	1	2	4/0 CAA	1100	42,87	34,69
3	2	3	1/0 CAA	1650	62,53	22,65
4	3	4	1/0 CAA	2000	25,18	3,24
5	4	5	4/0 CA	1545	60,34	34,31
6	5	6	4/0 CA	2590	75,00	32,65
7	6	7	4/0 CA	1560	23,88	7,35
8	7	8	1/0 CAA	890	13,71	6,96

9	8	9	1/0 CAA	2580	45,00	40,28
10	9	10	1/0 CAA	1590	53,77	39,56
11	10	11	1/0 CAA	100	24,14	6,68
12	11	12	1/0 CAA	2140	65,88	42,82
13	12	13	1/0 CAA	200	71,77	23,41
14	13	14	1/0 CAA	1420	75,00	62,74
15	14	15	4 CAA	550	10,22	18,90
16	15	16	4 CAA	670	36,72	17,85
17	16	17	4 CAA	1600	51,64	4,00
18	17	18	4 CAA	1150	30,51	12,81
19	18	19	4 CAA	150	73,90	21,26
20	19	20	4 CA	885	84,34	82,29
21	20	21	1/0 CAA	280	61,57	21,52

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADIBI, M. M., THORNE, D. K. Local load shedding. *IEEE Transactions on Power Systems*, v.3, n.3, August, p.1220-1229. 1988.

ANDRADE, F. F., KNOLSEISEN, A. B., GAULKE, E., *et al.* *Uma Metodologia Multicritério para Operação Coordenada dos Desligamentos e Restabelecimentos de Energia aos Consumidores*. CIDEL. Buenos Aires, 2006. 6 p.

ANEEL. Resolução Normativa Nº. 177, de 28 de Novembro de 2005. Brasília.

_____. Resolução Normativa Nº. 024, de 27 de Janeiro de 2000. Brasília.

_____. Resolução Normativa Nº. 264, de 13 de Agosto de 1998. Brasília.

_____. Resolução Normativa Nº. 505, de 26 de Novembro de 2001. Brasília.

_____. Resolução Normativa Nº. 676, de 19 de Dezembro de 2003. Brasília.

BARAN, M. E., WU, F. F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing. *IEEE Transaction on Power Delivery*. 1989.

BAZARAA, M. S., SHETTY, C. M. *Nonlinear programming - Theory and algorithms*. New York: John Wiley & Sons. 1979

BELTON, V., STEWART, T. J. *Multiple criteria decision analysis – An integrated approach*. Massachusetts: Klumer. 2002

BILLINTON, R., SATISH, J. Effect of rotational load shedding on overall power system adequacy indices. *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, v.143, n.2, March, p.181-187. 1996.

CAMARGO, C. C. D. B., COELHO, J., GAULKE, E., *et al.* *Sistema inteligente de apoio à decisão de corte de carga*. VI Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica (SBQEE). Belém, 2005. 6 p.

CANTÚ-PAZ, E. *A summary of research on parallel genetic algorithms*. July, 1995

CASTRO, R. E. D. *Otimização de estruturas com multi-objetivos via algoritmos genéticos*. (Tese de Doutorado em Engenharia Civil). COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2001. 197 p.

CHANKONG, V., HAIMES, Y. Y. *Multiobjective decision making theory and methodology*. New York: North-Holland. 1983

CHEN, C.-S., WU, T.-H., LEE, C.-C., *et al.* The application of load models of electric appliances to distribution system analysis. *IEEE Transactions on Power Systems*, v.10, n.3, p.1376-1382. 1995.

COELHO, J. *Planejamento e operação de sistemas de distribuição (Curso Tutorial)*. Congresso Latinoamericano de Distribución de Energia Electrica. Viña del Mar, 1996. 120 p.

_____. *Representação probabilística da carga em fluxo de potência de sistemas de distribuição*. LabPlan - UFSC. Florianópolis: Fevereiro, 2000. (Relatório interno)

COELHO, J., PARADA, G. M. O. *Propuesta de reglamentación de la calidad de servicio en sistema de distribución*. Congreso latino americano de generación y transporte de energia electrica. Viña del Leste, 2000. 5 p.

COELHO, J., COSTA, E. S., GAULKE, E. *Avaliação de índices de qualidade de concessionárias de energia elétrica no Brasil*. Labplan - UFSC. Florianópolis: Novembro, 2000. (Relatório projeto Gerasul/Labplan/UFSC)

COSTA, E. S. *Frequência e duração da violação de tensão em sistemas de distribuição*. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, UFSC, Florianópolis, 2001.

CÔTÉ, P., CÔTÉ, S.-P., LACROIX, M. *Programmable load shedding systems - Hydro-Québec's experience*. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting. Vancouver. July, 2001. 6 p.

CROCE, F., FAZZINI, B. D. P. A., MASSUCCO, S., *et al.* Operation and management of the electric system for industrial plants: An expert system prototype for load-shedding operator assistance *IEEE Transactions on Industry Applications*, v.37, n.3, June, p.701-708. 2001.

DIAS, L. G., EL-HAWARY, M. E. Nonlinear parameter estimation experiments for static load modelling in electric power systems. *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, v.136, n.2, p.68-77. 1989.

ECHAVARREN, F. M., LOBATO, E., ROUCO, L., *et al.* *A load shedding algorithm for improvement of load margin to voltage collapse.* IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings. Bologna. June 23-26, 2003. 6 p.

ENSSLIN, L., MONTIBELLER-NETO, G., NORONHA, S. M. *Apoio à Decisão: metodologias para estruturação de problemas e avaliação multicritério de alternativas.* Florianópolis: Insular. 2001

FONSECA, C. M., FLEMING, P. J. *Genetic algorithms for multiobjective optimization: Formulation, discussion and generalization.* Fifth International Conference on Genetic Algorithms, 1993. 8 p.

FU, X., WANG, X. *Load shedding scheme ensuring voltage stability.* Power Engineering Society General Meeting. Tampa:Florida, 2007. 6 p.

GAULKE, E. *Estudo de índices de qualidade.* LabPlan - UFSC. Florianópolis: Fevereiro, 2001. (Relatório interno)

GHOSH, A. K., LUBKEMAN, D. L., JONES, R. H. Load modeling for distribution circuit state estimation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v.12, n.2, p.999-1005. 1997.

GOLDBERG, D. E. *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning.* USA: Addison-Wesley. 1989

HAJDU, L. P., PESCHON, J., TINNEY, W. F., *et al.* Optimun load-shedding policy for power systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, n.3, p.784-794. 1968.

HAJELA, P., LIN, C. Y. Genetic search strategies in multicriterion optimal design. *Structural Optimization*, v.4, p.99-107. 1992.

HAYKIN, S. *Redes Neurais: princípios e prática.* Porto Alegre: Bookman. 2001

HOLLAND, J. H. *Adaptation in natural and artificial systems.* Ann Arbor: The University of Michigan Press. 1975. 211 p.

HORN, J., NAFPLIOTIS, N. *Multiobjective Optimization Using the Niche Pareto Genetic Algorithm.* Illinois Genetic Algorithms Laboratory, University of Illinois. Urbana, Champaign: July, 1993. (Report No. 93005)

HSU, C.-T., KANG, M.-S., CHEN, C.-S. Design of adaptive load shedding by artificial neural networks. *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, v.152, n.3, May, p.415-421. 2005.

IEEE. Load representation for dynamic performance analysis of power systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, v.8, n.2, p.472-482. 1993.

KNOLSEISEN, A. B. *Planejamento de sistemas de distribuição com enfoque na qualidade dos serviços e no desbalanceamento das redes*. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, UFSC, Florianópolis, 2001. 182 p.

LOPES, B. I. L., SOUZA, A. C. Z. D. *An approach for under voltage load shedding*. IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings. Bologna. June 23-26, 2003. 5 p.

LOPES, J. A. P., WA, W. C., PROENÇA, L. M. *Genetic Algorithms in the definition of optimal load shedding strategies*. Power Tech Budapest 99. Budapest, 1999. 1 p.

LU, Y., KAO, W.-S. Study of applying load shedding scheme with dynamic D-Factor values of various dynamic load models to Taiwan power system. *IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS*, v.20, n.4, November, p.1976-1984. 2005.

LUAN, W. P., IRVING, M. R., DANIEL, J. S. Genetic algorithm for supply restoration and optimal load shedding in power system distribution networks. *IEE Transmission and Distribution*, v.149, March, p.145-151. 2002.

LUENBERGER, D. G. *Introduction to nonlinear programming*. London: Addison-Wesley Publishing Company. 1984

MECHENBIER, J., ELLIS, A., CURTER, R. Load-shedding scheme protects utility from voltage collapse. *Transmission&Distribution World*: 4 p. 2004.

MIHIRIG, A., NGUYEN, H., ALLEN, A. J. *On-line fast load shedding to maintain system stability and operation for isolated oil field power system*. Petroleum and Chemical Industry Conference. Philadelphia, 2006. 7 p.

MOORS, C., LEFEBVRE, D., CUTSEM, T. V. *Design of load shedding schemes against voltage instability*. Power Engineering Society Winter Meeting. Singapore, 2000. 6 p.

OLIVEIRA, A. D. *Parâmetros de avaliação da importância estratégica das subestações da COPEL*. (Monografia de Curso de Especialização). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, UFSC, Florianópolis, 2004.

PARADA, G. M. O. *Proposta de regulamentação da qualidade de serviço em sistemas de distribuição*. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, UFSC, Florianópolis, 1999.

PARNIANI, M., NASRI, A. *SCADA based under frequency load shedding integrated with rate of frequency decline*. Power Engineering Society General Meeting, 2006. 6 p.

PAULO, A. R. G. D. S. *Previsão de carga à curtíssimo prazo utilizando redes neurais artificiais*. (Projeto de final de curso). Escola de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2004. 120 p.

PERUMAL, I. N., YING, C. C. *A proposed strategy of implementation for load shedding and load recovery with dynamic simulations*. National Power & Energy Conference (PECon). Kuala Lumpur, Malaysia, 2004. 185-189 p.

PRICE, W. W., WIRGAU, K. A., MURDOCH, A., *et al.* Load modeling for power flow and transient stability computer studies. *IEEE Transactions on Power Systems*, v.3, n.1, February, p.180-187. 1988.

RANADE, S. J., ELLIS, A., MECHENBIER, J. *The development of power system load models from measurements*. Transmission and Distribution Conference and Exposition, IEEE/PES, 2001. 6 p.

RAO, P. S. N., RAO, K. S. P. *An efficient load shedding algorithm for radial systems*. Conference on Convergent Technologies for Asia-Pacific Region - TENCON 2003. October, 2003. 4 p.

RUSSELL, S. J., NOVIG, P. *Artificial Intelligence: A modern approach* Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall. 1995

SAGE, A. P. *Concise encyclopedia of information processing in systems and organizations*. New York: Pergamon. 1990

SCHAFFER, J. D. *Some experiments in machine learning using vector evaluated genetic algorithms*. (Doctoral dissertation). Department of Electrical Engineering, Vanderbilt University, Tennessee, 1984.

SHAH, S., SHAHIDEHPOUR, S. M. A heuristic approach to load shedding scheme. *IEEE Transactions on Power Systems*, v.4, October, p.1421-1429. 1989.

SHARAF, A. M., IBRAHIM, S. T. Optimal capacitor placement in distribution networks. *Electrical Power Systems Research*, n.37, p.181-187. 1996.

SHOKOOH, F., DAI, J. J., SHOKOOH, S., *et al.* An intelligent load shedding (ILS) system application in a large industrial facility. Industry Applications Conference, 5th IAS Annual Meeting, 2005. 9 p.

SILVA, A. M. L. D., CASSULA, A. M., BILLINTON, R., *et al.* Optimum load shedding strategies in distribution systems. IEEE Porto Power Tech Conference. Porto. September, 2001. 6 p.

SPERANDIO, M. *Classificação de conjuntos consumidores de energia elétrica via mapas auto-organizáveis e estatística multivariada.* (Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, UFSC, Florianópolis, 2004. 92 p.

SRINIVAS, N., DEB, K. Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms. *Evolutionary Computation*, v.2, n.3, p.221-248. 1994.

STEESE, J. G. D., MERRICK, S. B., KENNEDY, B. W. Estimating methodology for a large regional application of conservation voltage reduction. *IEEE Transactions on Power Systems*, v.5, n.3, August, p.862-870. 1990.

SUBRAMANIAN, D. K. Optimum load shedding through programming techniques. *IEEE Transactions on Power Systems*, n.1, p.89-94. 1971.

VINCENT, T. L., GRANTHAM, G. J. *Optimality in parametric systems.* New York: John Wiley and sons. 1981

WANG, H., SCHULZ, N. N. *A load modeling algorithm for distribution system state estimation.* Transmission and Distribution Conference and Exposition, IEEE/PES. Atlanta, 2001. 4 p.

WANG, P., BILLINTON, R. Optimum load-shedding technique to reduce the total customer interruption cost in a distribution system. *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, v.147, n.1, January, p.51-56. 2000.

WANGDEE, W., BILLINTON, R. *Utilization of time varying event-based customer interruption cost load shedding schemes.* 8th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems. Arnes, 2004. 7 p.

WONG, K. P., LAU, B. S. Algorithm for load-shedding operations in reduced generation periods. *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, v.139, n.6, November, p.478-490. 1992.

ZADEH, L. A. Fuzzy Sets. *Information and Control*, v.8. 1965.

ZITZLER, E., THIELE, L. *An evolutionary algorithm for multiobjective optimization: The Strength Pareto approach*. Computer Engineering and Communication Networks Lab - TIK, Swiss Federal Institute of Technology - ETH. Zurich: May, 1998. (Report No. 43)