

WALÉRIO SANDRO DA COSTA MOREIRA

**PRIORIZAÇÃO DE OBRAS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO
DE ENERGIA ELÉTRICA UTILIZANDO ALGORITMOS
GENÉTICOS MULTIOBJETIVOS**

**FLORIANÓPOLIS
2009**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**PRIORIZAÇÃO DE OBRAS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO
DE ENERGIA ELÉTRICA UTILIZANDO ALGORITMOS
GENÉTICOS MULTIOBJETIVOS**

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

WALÉRIO SANDRO DA COSTA MOREIRA

Florianópolis, Março de 2009

PRIORIZAÇÃO DE OBRAS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA UTILIZANDO ALGORITMOS GENÉTICOS MULTIOBJETIVOS

Walério Sandro da Costa Moreira

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

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

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

Banca Examinadora:

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

Prof. Jorge Coelho, D.Sc.

Prof. Hans Helmut Zürn, Ph.D.

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

*Ao meu primeiro grande amor,
Deus, o SENHOR,
por ter me dado a oportunidade de
conhecê-lo, apreciar seu infinito amor,
por meio de seu filho, Jesus Cristo,
e pela força e coragem
que o Mesmo tem me concedido a cada dia.*

*Aos meus queridos e amados pais,
Edilma e Waldemir Moreira,
pelo amor e carinho que sempre demonstraram,
pelos princípios e valores ensinados
e pela confiança que , em mim, depositaram.*

*Ao meu segundo grande amor,
Miriane Ramos Vianna,
pelo carinho e companheirismo,
pelo amor e incentivo,
pela compreensão em tempos de ausência
e pela dedicação nos momentos em que mais precisei.*

*Aos familiares e amigos,
pela satisfação da companhia
e pelos momentos de descontração e alegria.*

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Professor Raimundo Celeste Ghizoni Teive, pela confiança, amizade, dedicação e apoio durante a realização de trabalho.

Aos professores do Laboratório de Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica – LabPlan/UFSC, pelos conhecimentos transmitidos e momentos de descontração.

Aos amigos do LabPlan, pela gratificante amizade e momentos de alegria. Em especial aos grandes amigos da turma de mestrado 2005: Matheus Cruz, Otávio Vaz, Raphael Gonçalves e Rodrigo Sória.

A Ritchie Guder e Maurício Sperandio, pelo grande apoio no desenvolvimento deste trabalho.

A Vitor Lopes Guimarães e Sidney Luiz Corrêa, gerentes da Celesc Distribuição S.A., pelo incentivo durante o período de preparação deste trabalho de dissertação.

Aos amigos de trabalho da Celesc Distribuição S.A., pelos diversos momentos de alegria e também pelas dificuldades enfrentadas em conjunto.

As amizades da minha terra natal, Natal-RN, e aos membros da Primeira Igreja Batista de Florianópolis, pelos ensinamentos e lições que tenho aprendido a respeito da vida cristã, pelos momentos de euforia e diversão vivenciados.

À Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC pelo apoio técnico e a CAPES pelo apoio financeiro durante o período em que fui bolsista.

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

PRIORIZAÇÃO DE OBRAS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA UTILIZANDO ALGORITMOS GENÉTICOS MULTIOBJETIVOS

WALÉRIO SANDRO DA COSTA MOREIRA

Março/2009

Orientador: Raimundo Celeste Ghizoni Teive, D.Eng.

Área de Concentração: Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica

Palavras-chave: Priorização de Obras, Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica, Algoritmos Genéticos, Conjuntos de Pareto.

Número de Páginas: 106

Este trabalho propõe uma metodologia e um modelo computacional aplicado ao problema de planejamento de sistemas de distribuição de energia elétrica, envolvendo a priorização de obras para a determinação de um plano indicativo otimizado de investimentos em redes de Média Tensão (MT). Este plano é gerado a partir de uma relação geral de obras, que leva em conta algumas características de cada um dos alimentadores em estudo. Para a modelagem deste problema, foi utilizado um método heurístico para otimização multiobjetivo (MO), envolvendo a técnica de algoritmos genéticos e a teoria da fronteira ótima de Pareto. A metodologia para priorização de obras é composta, basicamente, de três estágios: o primeiro realiza a verificação de dominância da população corrente; o segundo cria um nicho para indivíduos não-dominados; e o terceiro realiza a manutenção deste nicho para indivíduos não-dominados. Por meio de uma implementação computacional, foram executados testes de validação com informações de uma concessionária real, demonstrando a eficácia da metodologia desenvolvida.

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

WORKS PRIORIZATION IN ELECTRICAL ENERGY DISTRIBUTION NETWORKS BY USING MULTIOBJECTIVE GENETIC ALGORITHMS

WALÉRIO SANDRO DA COSTA MOREIRA

March/2009

Advisor: Raimundo Celeste Ghizoni Teive, D.Eng.

Area of Concentration: Electrical Energy Systems Planning.

Keywords: Works Priorization, Electrical Energy Distribution Networks, Genetic Algorithms, Pareto Sets.

Number of Pages: 106

This work proposes a methodology and computational model applied to the problem of planning of electrical energy distribution networks, involving the works prioritization for the determination of an optimized indicative plan of investment in medium voltage networks. This plan is generated from a general list of work, which takes into account some characteristics of each feeder under study. For the modeling of this problem, a heuristic method was used for multiobjective optimization, involving the technique of genetic algorithms and the theory of the Pareto optimal frontier. The methodology for works prioritization consists basically of 3 stages: the first checks the dominance of the current population, the second creates a niche for non-dominated individuals, and the third performs the maintenance of this niche for non-dominated individuals. With this computational implementation, validation tests were performed with information from a real distribution utility, demonstrating the effectiveness of the developed methodology.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	xxiii
LISTA DE TABELAS	xxv
LISTA DE ABREVEATURAS	xxvii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO	2
1.2. JUSTIFICATIVA	4
1.3. MOTIVAÇÃO	4
1.4. OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS	5
1.4.1. <i>Objetivos Gerais</i>	5
1.4.2. <i>Objetivos Específicos</i>	6
1.5. ESTRUTURA DO TRABALHO	6
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
2.1. ESTADO DA ARTE	10
2.2. CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	23
3. ALGORITMOS GENÉTICOS	25
3.1. INTRODUÇÃO	26
3.2. TERMINOLOGIA	28
3.3. CARACTERÍSTICAS GERAIS	29
3.4. ESTRUTURA BÁSICA DOS AG's	31
3.5. OPERADORES GENÉTICOS	32
3.5.1. <i>Função de Avaliação</i>	32
3.5.2. <i>Seleção</i>	33
3.5.2.1. <i>Roleta Viciada</i>	33
3.5.2.2. <i>Torneio</i>	34
3.5.2.3. <i>Amostragem Estocástica Uniforme</i>	35
3.5.3. <i>Crossover</i>	36
3.5.3.1. <i>Crossover com um ponto</i>	37

3.5.3.2. <i>Crossover</i> com dois pontos	37
3.5.3.3. <i>Crossover Uniforme</i>	37
3.5.4. <i>Mutação</i>	38
3.6. ALGORITMO GENÉTICO DE PARETO	38
3.7. CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	41
4. PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	43
4.1. INTRODUÇÃO	44
4.2. O PROBLEMA DE PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO	45
4.3. ASPECTOS TÉCNICOS DO PLANEJAMENTO	47
4.4. TECNICAS APLICADAS AO PROBLEMA	51
4.5. PRIORIZAÇÃO DE OBRAS	53
4.5.1. <i>Objetivo</i>	53
4.5.2. <i>Priorização de Obras Utilizando AG</i>	54
4.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	55
5. METODOLOGIA PROPOSTA	57
5.1. APRESENTAÇÃO DA METODOLOGIA DE PRIORIZAÇÃO DE OBRAS	58
5.2. 1º ESTÁGIO – VERIFICAÇÃO DE DOMINÂNCIA DA POPULAÇÃO CORRENTE	61
5.3. 2º ESTÁGIO – CRIAÇÃO DE NICHO PARA INDIVÍDUOS NÃO-DOMINADOS	63
5.4. 3º ESTÁGIO – MANUTENÇÃO DE NICHO PARA INDIVÍDUOS NÃO-DOMINADOS	65
5.5. DETALHES DO AG DESENVOLVIDO	67
5.5.1. <i>Inicialização do AG</i>	68
5.5.2. <i>Valores Globais Por Objetivo</i>	68
5.5.3. <i>Cromossomo e Apresentação dos Resultados</i>	68
5.5.4. <i>Seleção, Crossover e Mutação</i>	69
5.5.5. <i>Critério de Parada</i>	70
5.5.6. <i>Função de Avaliação (Fitness) e Armazenamento de Resultados</i>	70
5.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	70
6. SIMULAÇÕES E RESULTADOS	73

6.1. DESCRIÇÃO DAS ETAPAS DE SIMULAÇÃO	74
6.2. DADOS DAS OBRAS E SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO UTILIZADOS NOS ESTUDOS	74
6.3. ESTUDO DE CASO I	75
6.4. ESTUDO DE CASO II	77
6.5. ESTUDO DE CASO III	80
6.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	86
7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	89
7.1. Considerações Finais	90
7.2. Sugestões para trabalhos futuros	91
APÊNDICE A – DADOS OPERACIONAIS DOS ALIMENTADORES	93
A.1 DADOS PARA O ESTUDO DE CASO I	95
A.2 DADOS PARA O ESTUDO DE CASO II	95
A.3 DADOS PARA O ESTUDO DE CASO III	96
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	101

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Função hipotética com um máximo local e outro global	27
Figura 3.2 – Esquema de um algoritmo genético	31
Figura 3.3 – Método da roleta viciada	34
Figura 3.4 – Método do Torneio	35
Figura 3.5 – Método da amostragem estocástica uniforme	36
Figura 3.6 – Cruzamento com um ponto de corte	37
Figura 3.7 – Cruzamento com dois pontos de corte	37
Figura 3.8 – Cruzamento uniforme	38
Figura 3.9 – Mutação	38
Figura 4.1 – Representação simplificada de um sistema de distribuição	48
Figura 4.2 – Saída de alimentadores (rede compacta) de uma subestação	50
Figura 4.3 – Estrutura com três alimentadores, onde dois são em rede multiplexada	51
Figura 5.1 – Fluxograma da metodologia para priorização de obras	60
Figura 5.2 – Fluxograma do algoritmo para verificação da dominância da população corrente	62
Figura 5.3 – Fluxograma do algoritmo para criação de nicho para indivíduos não-dominados	64
Figura 5.4 – Fluxograma do algoritmo para manutenção de nicho para indivíduos não-dominados	66
Figura 5.5 – Representação cromossômica e apresentação dos resultados	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 – Legenda do fluxograma apresentado na figura 5.2	63
Tabela 5.2 – Legenda do fluxograma apresentado na figura 5.3	64
Tabela 5.3 – Legenda do fluxograma apresentado na figura 5.4	67
Tabela 6.1 – Relação de obras propostas para o Caso I	75
Tabela 6.2 – Relação de planos de expansão selecionados para o Caso I	76
Tabela 6.3 – Relação de obras propostas para o Caso II	77
Tabela 6.4 – Relação de planos de expansão gerado para o Caso II, Simulação 1	78
Tabela 6.5 – Resultado apresentado pelos especialistas da concessionária para o Caso II, Simulação 1	79
Tabela 6.6 – Relação de planos de expansão gerado para o Caso II, Simulação 2	80
Tabela 6.7 – Relação de obras propostas para o Caso III	81
Tabela 6.8 – Relação de planos de expansão gerado para o Caso III, Simulação 1	82
Tabela 6.9 – Relação de planos de expansão gerado para o Caso III, Simulação 2	84

LISTA DE ABREVIATURAS

ABRADEE	Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica
ACS	<i>Ant Colony Search</i>
AG	Algoritmo Genético
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AT	Alta Tensão
BT	Baixa Tensão
DEC	Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
EENS	<i>Expected Energy Not Supplied</i>
END	Energia Não Distribuída
EPDM	<i>Ethylene Propylene Diene M-class</i>
FEC	Freqüência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
GRASP	Greedy Randomized Adaptive Search Procedures
KEPCO	Korea Electric Power Corporation
kV	Quilovolt
MO	Multiobjetivo
MOGA	<i>Multiobjective Optimization Genetic Algorithm</i>
MT	Média Tensão
NMQ	Nível Mínimo de Qualidade
NPGA	<i>Niched Pareto Genetic Algorithm</i>
NSGA	<i>Nondominated Sorting Genetic Algorithm</i>
R\$	Reais
PMOGA	<i>Pareto Multiobjective Genetic Algorithm</i>
SAIDI	<i>System Average Interruption Duration Index</i>
SAIFI	<i>System Average Interruption Frequency Index</i>
SE	Subestação
SGA	<i>Simple Genetic Algorithm</i>

SISPAI-BT	Sistema para Planejamento Agregado de Investimentos em Redes de Baixa Tensão
SPEA	<i>Strength Pareto Evolutionary Algorithm</i>
TRII	Taxas de Rentabilidade Inicial de Investimento
V	Volt
VEGA	<i>Vector Evaluated Genetic Algorithms</i>
VNS	Variable Neighborhood Search
ΔV	Queda de Tensão
XLPE	<i>Cross Linked Polyethene</i>

CAPÍTULO

1

INTRODUÇÃO

*N*este capítulo é feita uma breve contextualização das mudanças ocorridas no setor elétrico brasileiro, mais especificamente na área de distribuição de energia elétrica, com uma breve apresentação do problema de planejamento da expansão de sistemas de distribuição e quais as justificativas e motivações para o desenvolvimento deste assunto. Em seguida, têm-se os objetivos gerais e específicos deste trabalho, finalizando com a estruturação desta dissertação de mestrado.

1.1 Contextualização

Neste século, a expansão do sistema de energia elétrica no Brasil, foi um dos fatores responsáveis pela modernização da sociedade e a melhoria do padrão de vida da população brasileira. Atualmente, nos países industrializados, praticamente todas as atividades executadas diariamente pelas pessoas e o funcionamento da sociedade depende do suprimento seguro e adequado da energia. A sua falta pode reduzir o nível da atividade no comércio e na indústria, causar prejuízos à segurança pública e à estabilidade social, podendo trazer incômodos à vida cotidiana da população, em função de interrupções no funcionamento das infra-estruturas sociais, tais como: comunicação, transporte e saúde.

Com o passar do tempo, a energia elétrica transformou-se em um produto essencial para o desenvolvimento humano, possibilitando, assim, inovações tecnológicas que colaboraram para o bem estar das pessoas. Até a década de noventa, as atividades relacionadas à sua produção, transmissão, distribuição e comercialização eram fornecidos, unicamente, por empresas de caráter estatal e monopolista, verticalmente integradas.

Com a reestruturação do setor elétrico, foi imposta a necessidade de tratar a energia como um produto associado a serviços para prover a sua entrega aos consumidores com requisitos de segurança, confiabilidade e qualidade, estando o setor sujeito a investimentos privados e regras de mercado (Silva, 2001). Logo, tornou-se imperativa a criação de novos paradigmas e objeções para o funcionamento do mesmo, relacionado à chamada indústria de energia elétrica. Em decorrência deste fator, o setor elétrico submeteu-se a um acelerado ritmo de mudanças de processos e estrutura nos seus diversos segmentos.

Com as privatizações de várias concessionárias brasileiras, o controle do setor elétrico ganha novos provedores. Com isso, surge a necessidade de um órgão regulador para o acompanhamento e auditoria da qualidade do serviço. Com isso, foram criadas a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, e as agências estaduais, no dever de controlar e fiscalizar este setor.

Em conformidade com a legislação de criação da ANEEL, são três as macrofunções de sua competência: regular, fiscalizar e dirimir conflitos. Por delegação da União, compete também à Agência a concessão do serviço público de energia elétrica. Além disto, têm também o compromisso de estabelecer uma relação entre a qualidade e os investimentos necessários ao seu atendimento, obrigando as empresas distribuidoras de

energia a buscar continuamente a eficientização dos seus processos e serviços (www.aneel.gov.br).

Na área de distribuição de energia elétrica, muitos modelos matemáticos vêm sendo propostos para auxiliar os engenheiros em estudos de planejamento da expansão com os mais variados enfoques, pois isto depende dos objetivos a serem alcançados. Estes estudos são de fundamental importância, pois a partir desses são estimados os investimentos necessários à melhoria da qualidade do serviço e do produto energia elétrica. Alguns estudos focados no conceito de planejamento agregado de investimentos têm sido aplicados nesta área (Squaiella, 2004; Antunes, 1999).

O modelo de planejamento agregado de investimentos tem por objetivo a determinação dos recursos a serem comissionados no sistema de distribuição, para atendimento dos critérios técnicos, levando em conta níveis de qualidade de serviço e economicidade pré-estabelecidos pelo planejador. Assim, esta ferramenta permite a adequada análise de investimentos no sistema de distribuição em função desses níveis, auxiliando as empresas para que se mantenham com um padrão de fornecimento adequado e dentro do que estabelece o órgão regulador.

O planejamento voltado à expansão de redes de distribuição é necessário sempre que a demanda de uma região apresenta um crescimento que a aproxima dos limites de operação dos equipamentos, ou quando se deseja atender uma nova área. A expansão deve envolver a construção e/ou ampliação de subestações, instalação de postes e/ou recondutoramento de trechos de alimentadores, entre outras operações, todas estas com altos custos de investimentos associados.

Para propiciar a redução de custos no processo de melhoria ou construção de redes de distribuição, as concessionárias precisam realizar uma boa gestão dessas atividades, permitindo que as mesmas possam continuar no mercado energético de forma lucrativa e eficiente.

Surge, então, a necessidade de realizar a priorização dessas atividades de construção e melhoria, isto é, indicar quais possuem melhor relação benefício/custo, para que o planejador possa realizar uma avaliação prévia e posteriormente indicar que obras serão executadas, a partir de determinadas restrições econômicas.

No contexto atual de forte crescimento do consumo de energia elétrica no Brasil, em torno de 5% ao ano, as empresas concessionárias de distribuição têm sido obrigadas a

incorporar, em seus estudos de planejamento da expansão, restrições orçamentárias e, eventualmente, o conceito de priorização de obras. Neste sentido, as metodologias de suporte à tarefa de planejamento da expansão da distribuição devem se adequar a esta nova realidade.

1.2 Justificativa

Com a modernização do modelo elétrico brasileiro, mudanças têm ocorrido nos setores de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Uma dessas mudanças foi o crescimento do mercado energético, que se tornou mais competitivo. Como forma de competir, as empresas precisam diminuir suas despesas, e entre várias formas existentes, uma delas seria a redução de custos na implantação de novas redes e em reformas nas redes existentes, sendo necessário, para isso, um bom planejamento do sistema (Szuvovivski, 2008).

Um planejamento adequado das redes de distribuição, no que diz respeito a sua expansão, deve ser realizado de forma a encontrar a melhor relação entre os investimentos previstos com a construção e melhoria destas redes e os ganhos obtidos nos níveis de tensão, no carregamento dos alimentadores relacionados e nos índices DEC e FEC, de maneira a melhorar a confiabilidade das redes e qualidade da energia, assim como o número de consumidores beneficiados com tais benfeitorias.

1.3 Motivação

A importância do planejamento da expansão de sistemas de distribuição pode ser compreendida quando se observa as dificuldades de análise e gestão de redes com elevado número de subestações e alimentadores, em horizontes de longo prazo. Assim, devem ser considerados cenários que, invariavelmente, estejam sujeitos a uma série de incertezas quanto à localização de cargas, custos, etc. Considerando-se ainda o ambiente de expressivas mudanças pelo qual passa o setor elétrico nacional, a economia brasileira e a economia mundial globalizada, o planejamento agregado de investimentos mostra-se bastante útil.

Em algumas concessionárias de energia elétrica do Brasil, o planejamento da expansão em nível de Média Tensão (MT) vem sendo realizado a partir do conhecimento

prático dos engenheiros mais experientes junto com a verificação de alguns parâmetros como: inadequados níveis de tensão, índices DEC e FEC de certos conjuntos violados, sobrecarga de alimentadores, etc.

Existe também uma grande preocupação por parte das concessionárias no que diz respeito à satisfação do consumidor. Instituições como a ABRADEE (Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica) têm premiado algumas empresas no requisito “Melhor Empresa Distribuidora na Avaliação do Cliente”, onde os próprios clientes avaliam os serviços prestados por essas. A criação de prêmios como esses têm incentivado as concessionárias a se preocuparem com a imagem da empresa segundo respaldo de seus clientes.

Haja vista esta realidade, vem crescendo o interesse por assuntos direcionados à área de planejamento agregado de investimentos voltado à expansão de sistemas de distribuição, além do estudo de metodologias que possibilitem o tratamento deste problema. O intuito desses estudos é aperfeiçoar as técnicas utilizadas por essas concessionárias, fazendo com que as mesmas possam reduzir custos decorrentes da melhoria/construção de suas redes.

1.4 Objetivos Gerais e Específico

1.4.1 Objetivos Gerais

O presente trabalho visa o desenvolvimento de uma metodologia que utilize os conceitos da Fronteira Ótima de Pareto para otimização multiobjetivo (MO), para a determinação de um plano indicativo otimizado de investimentos em redes de MT, a partir de um plano geral de obras, que leva em conta algumas características de cada um dos alimentadores em estudo.

Esta metodologia utilizará um método heurístico para otimização MO, envolvendo a técnica de algoritmos genéticos, e terá como objetivo auxiliar os engenheiros na definição de um plano de obras relacionado à expansão da distribuição em nível de MT.

1.4.2 Objetivos Específicos

A proposta deste trabalho abrange sistemas de energia elétrica de forma geral, tendo como referência um plano de obras de MT de uma determinada concessionária de energia elétrica. Desta forma, os objetivos específicos são:

- Realizar uma pesquisa bibliográfica relacionada a artigos e outros documentos técnicos que focam o desenvolvimento de metodologias para realização do planejamento da expansão de sistemas de distribuição;
- Analisar a contribuição de algoritmos genéticos (AG) multiobjetivos para planejamento de sistemas de distribuição, enquanto metodologia para priorização de obras da distribuição, que objetiva encontrar um conjunto de planos de expansão com as melhores relações benefício/custo;
- Desenvolver uma rotina computacional que modele matematicamente o problema de planejamento da expansão, no tocante da priorização de obras da distribuição, baseado nos conceitos de AG e utilizando uma abordagem baseada na Fronteira de Pareto;
- Por fim, apresentar um estudo sintético, com simulações e comentários, para observar os resultados obtidos, com o intuito de verificar e validar a modelagem matemática proposta para o problema de priorização de obras de MT de sistemas de distribuição.

1.5 Estrutura do Trabalho

O presente trabalho está estruturado em sete capítulos, incluindo este de introdução, e para facilitar a compreensão dos assuntos abordados, os demais capítulos estão organizados da forma como descrito a seguir:

- O Capítulo 2 compõe-se da revisão bibliográfica de temas necessários para a elaboração da metodologia de priorização de obras de sistemas de distribuição, tais como: otimização MO, técnicas de otimização utilizando inteligência artificial, quesitos ligados à necessidade de priorização de obras em sistemas de distribuição, metodologias apresentadas na literatura para a priorização de obras;

- O Capítulo 3 apresenta um breve resumo sobre algoritmos genéticos, seus principais conceitos, como terminologia, características gerais, estrutura básica, operadores genéticos e uma idéia geral sobre os algoritmos genéticos de Pareto;

- No Capítulo 4 foi realizada uma breve explanação a respeito da importância do Planejamento da Expansão de Sistemas de Distribuição, sua função, como as concessionárias têm realizado esta atividade, o que motiva essas empresas a planejar o seu sistema, formas de resolução do problema de planejamento da expansão e o porquê de utilizar a teoria de algoritmos genéticos para resolver o problema de priorização de obras em sistemas de distribuição;

- A metodologia desenvolvida para a apresentação dos bons planos de expansão, selecionando as melhores obras de acordo com os critérios selecionados e a faixa de orçamento previsto para ser investido é apresentada no Capítulo 5;

- Para validar a metodologia e a rotina computacional desenvolvida, o Capítulo 6 descreve alguns estudos de caso para a priorização de obra de uma determinada concessionária de energia elétrica, onde uma série de obras são propostas, e esta metodologia seleciona as melhores obras levando em conta a relação benefício/custo das mesmas;

- O Capítulo 7 apresenta comentários finais, as conclusões obtidas deste trabalho, bem como algumas sugestões para trabalhos futuros, levando em conta as contribuições desta dissertação.

CAPÍTULO

2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo tem como objetivo a apreciação de algumas publicações realizadas a respeito do planejamento da expansão de sistemas de distribuição e outros temas correlacionados, com o intuito de apresentar alguns conceitos e procedimentos ligados a este trabalho. Nestas publicações, apesar do problema a ser resolvido ser o mesmo, as abordagens no que diz respeito à metodologia proposta são diversificadas.

2.1 Estado da Arte

Em meados da década de 90, o problema de planejamento da expansão de sistemas de distribuição passou a ser estudado a partir da utilização de algumas técnicas que variam desde as técnicas de otimização do tipo Gerar-e-Testar, até os métodos que utilizam os conceitos de Metaheurística, na qual os Algoritmos Genéticos se enquadram.

Com isso, Miranda, Ranito e Proença (1994) apresentaram uma metodologia para o planejamento multi-estágio de redes de distribuição utilizando algoritmos genéticos. Os objetivos eram a minimização do custo de investimento anual, das perdas de potência nos alimentadores, da queda de tensão nestes e índices de confiabilidade, que são representados por uma “função confiabilidade”.

O modelo apresentado é bastante flexível devido a muitas características realistas, e condições de natureza prática podem ser expressas. Um exemplo disso é a consideração de vários objetivos, de múltiplos alimentadores no mesmo trecho, a possibilidade da não utilização (desativação) de alimentadores em alguns estágios, reutilizar este em uma etapa posterior e gerar soluções de forma radial.

Lin, Su e Tsay (1998) elaboram um trabalho que tem o objetivo de usar as teorias dos AG's no problema de planejamento ótimo de sistemas de distribuição, que possui natureza discreta da instalação de subestações (SE) e alimentadores. Os equipamentos foram codificados com 0 e 1, que indica que eles são “não aceitos” ou “aceitos”, respectivamente. Um único cromossomo representa a topologia da rede. A função de avaliação funciona como um índice da solução final. Cada cromossomo tem um valor relacionado a esta função.

Com o objetivo de obter um ganho de eficiência no processo de busca realizado pelo AG, vários operadores são combinados com algumas restrições. A formulação do problema ocorre da seguinte forma: encontrar a maneira ótima de atender a um conjunto de cargas, tal que as perdas e o custo de construção do sistema sejam mínimos. O custo de construção é composto pelo tamanho e localização das SE's e alimentadores.

A partir dos testes realizados neste trabalho, foi possível concluir que os AG's podem obter boas soluções no que diz respeito ao problema de Planejamento de Sistemas de Distribuição.

A pesquisa realizada por Carvalho *et al.* (2000) tratou o problema de planejamento da expansão de redes de distribuição de forma determinística, sendo este por si só de grande escala, complexo, difícil de ser definido, de natureza combinatória com relação à decisão a ser tomada, podendo ser eficientemente manuseado por uma aproximação evolucionária específica.

Foi desenvolvido, no contexto da otimização evolucionária, um algoritmo para lidar com a representação de cenários de incerteza. O problema foi decomposto e relaxado para aproximar progressivamente de uma solução global e viável. A decisão do primeiro estágio é encontrada trazendo informações dos outros cenários em cada um dos subproblemas do processo de otimização.

Com o objetivo de abordar aspectos importantes de suas experiências, Ferreira *et al.* (2001) descrevem como lidar com problemas de planejamento da expansão e planejamento da operação utilizando técnicas de computação evolucionária. Os autores consideram como importante papel do processo, a permuta de caminhos tomados pelo algoritmo na procura da solução ótima.

O algoritmo desenvolvido realiza análises com relação à decisão ótima a ser tomada em relação às seguintes variáveis: custo de investimento, que está associado com os ramos da rede, novos equipamentos a serem instalados, instalação de novos condutores, etc.; decisões topológicas, que são as seleções de possíveis novos ramos, conectar ramos existentes já desconectados e desconectar ramos existentes já conectados; análise tensão-corrente nos alimentadores; e confiabilidade, através dos indicadores EENS (*Expected Energy Not Supplied*), SAIDI (*System Average Interruption Duration Index*) e SAIFI (*System Average Interruption Frequency Index*). O cálculo dos indicadores SAIDI e SAIFI é idêntico ao dos índices DEC e FEC, respectivamente.

Também voltado ao planejamento da expansão, Filho (2003) apresenta uma metodologia computacional que utiliza técnicas de computação evolucionária, utilizando algoritmo genético e *branch-and-bound* para priorização de melhorias destinadas a redes de Baixa Tensão (BT), para atendimento adequado dos clientes, buscando maximizar o retorno dos investimentos realizados pela concessionária.

A metodologia incorpora a análise de fluxo de potência dos circuitos da rede secundária e as exigências e penalidades impostas pelo órgão regulador, além de uma

abordagem probabilística que foi inserida considerando diversas curvas de carga típicas de cada tipo de consumidor (residencial, comercial, industrial e iluminação pública).

A rotina desenvolvida analisa todos os melhoramentos existentes, selecionando aqueles que tenham maiores retornos dos investimentos e que atendam aos critérios de nível de tensão e continuidade do serviço, obedecendo à restrição financeira imposta pela concessionária.

Braz, Souza e Alves (2004) tratam da resolução do problema de planejamento de sistema de distribuição utilizando algoritmos genéticos, com uma estratégia de codificação de cromossomos geminados, com um destes contendo informações de conectividade da rede e outro com o condutor empregado naquele trecho.

No que diz respeito à função objetivo empregada neste trabalho, esta contém os seguintes parâmetros: perdas diárias de energia do sistema, custo da energia desperdiçada, período de tempo contabilizado, comprimento dos possíveis trechos a serem construídos, custo de cabeamento e estrutura destes trechos, e fatores de amortização de cabeamento e estruturas para cada um destes trechos. Estes parâmetros foram considerados para que se tenha um modelo mais realista possível, no intuito de se obter bons resultados.

Com esta estratégia de modelagem, foram obtidos bons resultados quando comparados com uma estratégia de codificação convencional. Apesar de se ter verificado um acréscimo no tempo de processamento por indivíduo, foi obtido um menor tempo de convergência.

Na proposta de Ngatchou, Zarei e El-Sharkawi (2005), estes apresentaram conceitos na solução de problema de otimização multiobjetivo (MO) utilizando AG, focado na técnica de geração da fronteira de Pareto. Uma solução pertence ao conjunto de Pareto caso não exista outra que melhore pelo menos um dos objetivos sem degradar um dos outros (Linden, 2006). No trabalho são descritos alguns métodos para resolver este tipo de problema.

O método proposto por Martins e Borges (2008) para a resolução do problema de planejamento estático da expansão de sistemas de distribuição utilizando algoritmos genéticos, a geração distribuída é considerada juntamente com alternativas convencionais de expansão, tais como recondutoramento de linhas, reconfiguração da rede, etc. Este problema é formulado a partir de um problema de programação não linear mista, contendo variáveis contínuas, como tensões, ângulos, potências geradas (ativa e reativa) e variáveis

discretas, tais como o estado das chaves e as potências das unidades de geração distribuída a serem instaladas no sistema.

O objetivo proposto pelos autores consiste em obter uma configuração radial que minimize a função objetivo, onde esta é constituída pelos custos anuais relativos a perdas de energia, valor esperado de energia não distribuída (END), encargos devido à utilização das redes de transmissão e a máxima queda de tensão na rede.

Para cada possível configuração, é executado um fluxo de potência não linear para se determinar os fluxos de potência nas linhas, perdas de potência, módulos de tensões nas barras, etc. O valor de aptidão de cada indivíduo é obtido através de uma soma normalizada de seus objetivos.

As configurações que não atendem à restrição de radialidade ou qualquer outra são penalizadas.

Os resultados apresentados foram considerados satisfatórios, aliado à consideração conjunta de várias alternativas de expansão em um único algoritmo.

A partir de uma abordagem de programação inteira-mista, Nara *et al.* (1994) propuseram uma metodologia para o problema de planejamento da expansão de sistemas de distribuição em que os casos de contingência são levados em consideração. Este método pode levar em conta todos os casos de falta grave simultaneamente, e pode evitar o excesso de benfeitorias (instalações, reformas, ampliações) sem afetar o seu desempenho para a restauração da falta.

No algoritmo, todo o problema é decomposto em subproblemas de acordo com casos pré-determinados de falta, e é resolvido utilizando um algoritmo de permuta de ramos.

O problema proposto foi encontrar uma configuração de sistema que possa fornecer energia para todas as seções de carga, exceto aquelas em que a contingência existe. De forma a minimizar o custo de instalação, o grau de redundância com relação ao número de benfeitorias precisa ser minimizado, sob a condição de que a energia ainda deve estar em condições de ser fornecida para cada seção de carga. Para que este grau de redundância seja minimizado, todas as contingências devem ser consideradas simultaneamente.

A função objetivo proposta é o somatório dos custos de instalação dos ramos que serão considerados no sistema, sujeito às restrições de instalação de equipamentos, de

configuração radial, das leis de Kirchhoff das correntes e tensões, da capacidade das linhas e de queda de tensão.

A partir da demonstração de alguns resultados foi possível validar a eficácia do algoritmo proposto.

Na proposta feita por Ramirez-Rosado e Bernal-Agustín (1998), os mesmos apresentaram um modelo para projeto ótimo a partir de programação inteira-mista não-linear para os problemas de dimensionamento otimizado e localização de alimentadores e subestações, que pode ser usado para um único estágio ou para o planejamento multi-estágio, onde se assume que a rede de distribuição existente é expandida de um estágio inicial até um dado período de planejamento.

O modelo apresenta uma função objetivo que representa o custo de investimento dos alimentadores e subestações futuros, assim como os custos variáveis não-lineares associados à operação do sistema de distribuição.

O algoritmo proposto obtém a localização ótima dos alimentadores e subestações a serem construídos para a futura expansão de um sistema de distribuição existente, a fim de satisfazer as suas futuras necessidades de demanda, levando em conta os limites de queda de tensão e demanda. Além disso, este também calcula um índice utilizado para avaliar a confiabilidade do sistema de distribuição para operação radial da rede, mesmo esta apresentando uma topologia não radial.

Os resultados exibidos neste trabalho mostraram a influência dos custos na modelagem da topologia da rede projetada para o sistema de distribuição.

Em Antunes *et al.* (2004), foi proposta uma metodologia para priorização de obras de expansão da distribuição, contemplando-se critérios técnicos e econômicos, e que considera, num mesmo ambiente, os reforços e correspondentes investimentos em todos os níveis do sistema, incluindo os segmentos de Alta, Média e Baixa Tensão.

A metodologia utiliza como insumos básicos de entrada, os conjuntos de obras de expansão potenciais, obtidas por meio de modelos de planejamento de longo prazo nos respectivos segmentos contemplados e que abranjam toda a área de concessão da empresa, além dos limites orçamentários previamente estabelecidos e que devem ser respeitados em todos os anos de estudo.

A concepção utilizada para se viabilizar a evolução otimizada das redes de BT, fundamentou-se em técnicas de programação dinâmica. Estas técnicas foram implementadas no SISPAI-BT.

Basicamente, a priorização de obras realizada no sistema de MT foi feita escolhendo, dentre as obras geradas com recursos dentro do orçamento anual estabelecido, aquelas que atendem aos critérios técnicos e apresentam as melhores Taxas de Rentabilidade Inicial de Investimento (TRII).

Inicialmente, foi elaborada uma lista ordenada de obras, escolhidas dentre aquelas aplicáveis às instalações existentes, que garantam o nível mínimo de qualidade (NMQ) e apresentem TRII maior que um TRII mínimo preestabelecido. A relação foi ordenada segundo TRII's decrescentes, sendo iniciada pelas obras que garantam o NMQ. Caso o orçamento não seja suficiente, as obras com as menores TRII's são descartadas. Se forem canceladas obras que garantam o NMQ, verifica-se a existência de outras que, embora de menor TRII, sejam de custo inferior a ponto de permitir o atendimento do NMQ dentro do orçamento previsto. Se não, haverá colapso por insuficiência de orçamento.

As obras propostas para o sistema de Alta Tensão (AT) são submetidas a um processo de otimização que utiliza recursos de programação linear inteira-mista e algoritmos de transporte. Nesta etapa, são selecionadas as obras estritamente necessárias, buscando o mínimo custo (investimento e perdas). Retorna-se ao ponto inicial e é realizada a evolução da carga para esse ano. Dentre as obras propostas, verificam-se quais delas devem ser instaladas no sistema neste ano e as subtrai da lista inicialmente proposta. Este processo se repete até o ano horizonte. Ao final, é obtida a otimização da rede AT, minimizando-se os custos de investimentos e operacionais durante o período de estudo.

Haffner *et al.* (2006) propuseram um modelo para o problema de planejamento da expansão de sistemas de distribuição de energia em múltiplos estágios. Para a resolução deste problema, os autores consideram a função objetivo a ser minimizada como sendo o valor presente dos custos totais de instalação, de operação e de manutenção da rede. Os custos de instalação estão relacionados a novos alimentadores e subestações.

No modelo apresentado, são consideradas restrições operacionais do sistema, relacionadas com a capacidade dos equipamentos e com os limites de tensão. Também são consideradas algumas restrições lógicas, com o objetivo de reduzir o espaço de busca. Este modelo de expansão considera a ampliação da capacidade das subestações existentes, a

instalação de novas subestações e os diferentes tipos de alterações possíveis nos alimentadores (ampliação, remoção, subdivisão, transferência de carga e substituição de condutores).

Uma extensão da formulação linear disjunta que é capaz de representar a inclusão, a exclusão e a substituição de ramos da configuração inicial foi proposta neste trabalho, assim como uma generalização das restrições relacionadas com a criação de novos caminhos que podem ser aplicados em topologias mais complexas. O modelo linear inteiro-misto resultante permite que a solução ótima seja obtida através de métodos de programação matemática, tais como algoritmo *branch-and-bound*.

No trabalho de Jonnavithula e Billinton (1996), os mesmos formularam o problema de planejamento de redes de distribuição como um problema não diferenciável e com restrições não lineares, tendo como objetivo principal a obtenção da localização ótima dos alimentadores de distribuição e das subestações, que minimize o custo de interrupção, o custo das perdas nos alimentadores, o investimento, o custo de manutenção e alcançar níveis de tensão aceitáveis. Este parâmetros estão diretamente relacionados com a configuração da rede de distribuição.

Penin (2000) estudou o que a análise de índices de qualidade pode trazer de benefícios para o planejamento agregado de investimentos, focado no âmbito de incertezas. Algumas ferramentas foram desenvolvidas para que fosse possível realizar o estudo de índices de qualidade do sistema de distribuição a ser estudado, com o intuito de complementar o modelo utilizado no SISPAI, Sistema Integrado de Planejamento Agregado de Investimento na Expansão de Sistemas de Distribuição, que tem como uma de suas funcionalidades a estimativa dos investimentos necessários à melhoria do nível de tensão de cada alimentador.

Os índices de qualidade considerados foram: DEC, FEC, ΔV , perdas, END, carregamento de alimentadores e carregamento de subestações. A evolução destes índices é informada à medida que as obras são geradas, onde a visualização dos resultados obtidos pode ser por subestação, por regional ou para todo o sistema, sendo possível também a análise de risco destes índices.

As ferramentas desenvolvidas neste trabalho e que foram objetivo do mesmo são: Análise de índices de qualidade por famílias, Impacto dos Investimentos na Qualidade (Relatórios Econômicos), Análise de Índices de Qualidade por Regionais e Custo

Incremental e Custo Marginal. A primeira ferramenta tinha a função de permitir a visualização do desempenho dos índices de qualidade no sistema a partir dos resultados do SISPAI. Já a segunda possibilitava a análise do volume de investimentos exigidos em cada cenário, verificando-se qual o impacto gerado por aumento ou diminuição de investimentos na qualidade. A terceira permitia ao planejador a regionalização do sistema, possibilitando-se o agrupamento de subestações existentes de acordo com algum tipo de afinidade entre elas. Na quarta, foram obtidos graficamente os custos incrementais médios de longo prazo por regional ou de todo o sistema, sendo fornecido também o valor do custo marginal para os diversos cenários abordados.

Choi *et al.* (2005) propuseram uma metodologia de apoio à decisão utilizada para priorização de investimentos em redes de distribuição considerando os índices de confiabilidade das mesmas. Com a utilização deste método, encontra-se um determinado nível de investimento a ser realizado no sistema da Korea Electric Power Corporation (KEPCO) a partir de uma seleção de obras candidatas à execução, utilizando para isso a lógica de fuzzy. Esta seleção é feita segundo a avaliação dos índices de continuidade desta empresa.

Os índices utilizados neste trabalho são o SAIFI (Índice de Freqüência de Interrupções Médio do Sistema) e o SAIDI (Índice de Duração de Interrupções Médio do Sistema). Alimentadores com altos índices de SAIFI e SAIDI são dados como de maior prioridade para a aplicação dos investimentos previstos.

O cálculo dos índices SAIFI e SAIDI é realizado a partir da taxa de falha, tempo de falta anual, número de clientes do ponto de carga e o número de pontos de carga do alimentador.

O método de análise de confiabilidade de redes de distribuição aplicado neste trabalho utiliza um método analítico, onde os dados de confiabilidade usados são os dados históricos da KEPCO. Foi assumido que a taxa de falha dos equipamentos instalados na rede aumenta exponencialmente com o passar dos anos.

A avaliação dos resultados apresentados mostrou que, considerando o limite orçamentário, com as obras propostas pela metodologia utilizada, obteve-se uma melhora nos índices de confiabilidade do sistema em questão quando comparado com as obras propostas pelo método convencional.

Em Yoshimoto (2003), o mesmo define o planejamento de redes de distribuição de BT como sendo a procura da melhor relação benefício/custo para levar energia através de redes secundárias para um conjunto pré-definido de consumidores. Como resposta do problema proposto, definiu-se o número, capacidade e localização dos transformadores de distribuição; determinação de todos os trechos das redes de BT, incluindo topologia, tipo e bitola dos cabos; e propostas dos trechos de rede primária para fazer a conexão com a rede secundária.

A metodologia foi dividida em três etapas, utilizando-se técnicas formais de otimização baseadas em heurísticas construtivas e de melhoria. Inicialmente localiza-se os transformadores utilizando o método das *p-medianas*. O objetivo do mesmo é determinar *p* locais que atenderão uma demanda associada a cada ponto, tendo-se um conjunto de pontos composto por *n* elementos. O somatório das distâncias percorridas por cada ponto de demanda até o local que o atenderá, *p*, deve ser a mínima possível. Em seguida, através do algoritmo de obtenção de caminhos mínimos, é feita a ligação dos consumidores aos transformadores, utilizando posteriormente o problema de Steiner para fazer o condutoramento da rede primária até estes transformadores.

O problema de Steiner é resolvido através de uma metodologia heurística baseada no algoritmo de Prim, que primeiramente monta um grafo completo não orientado com os nós onde já existem redes primárias e aqueles onde serão instalados os transformadores. Essa divisão é a fase construtiva do método “Greedy Randomized Adaptive Search Procedures (GRASP)”. Na fase de melhoria é aplicada uma Busca em Vizinhança Variável (“Variable Neighborhood Search – VNS”). A junção destes dois métodos forma o método “Holístico”, que constitui a metodologia abordada neste trabalho.

O trabalho escrito por Squaiella (2004) apresentou, aplicou e discutiu os resultados de uma metodologia que tinha por objetivo criar uma rede de distribuição de BT fictícia, auxiliada pelo software SISPAI-BT para estimar o volume de investimentos necessários para o planejamento de empresas que não possuem a rede BT cadastrada no seu sistema, a partir das informações das redes de MT.

Visou-se gerar condições para que as empresas enquadradas nesta situação pudessem realizar o seu planejamento de BT, a partir de uma metodologia capaz de criar tais redes. Uma vez obtidas, estas são inseridas em um software de planejamento agregado de investimentos que fornecerá o valor das aplicações necessárias para os próximos dez

anos. Ao final do processo, observou-se que os resultados alcançados são muito próximos aos valores esperados para as redes secundárias reais.

Inicialmente, a metodologia consistia em definir, para cada um dos alimentadores de cada uma das subestações, o número de transformadores por potência nominal que estão presentes nestes alimentadores. Obtido o número de pontos secundários, eram encontradas as quantidades de transformadores para cada classe de potência nominal. Com este número, calculava-se a potência total instalada neste alimentador. Após este cálculo, era definido o fator de demanda do circuito com a demanda secundária do alimentador sobre a potência total instalada neste. Uma vez conhecido este fator, eram obtidos os carregamentos médios dos transformadores para cada uma das classes de potência nominal.

Posteriormente, determinavam-se quantos transformadores, por classe de potência, ficarão dentro das cinco faixas de carregamento pré-determinadas. Finalmente pôde-se determinar o carregamento do transformador para cada uma das faixas de carregamento.

Na pesquisa feita por Kagan *et al.* (2004), são apresentadas modificações no modelo de planejamento agregado de investimentos clássico (expansão de redes), para incorporar novas ações de operação e manutenção preventiva. São elas: poda de árvore, instalação de redes compactas, instalação de religadores, reforma de rede, pára-raios e aumento do número de turmas de manutenção, com vistas a solucionar problemas relacionados aos índices de continuidade objetivando a redução dos custos de investimento nas redes, visto que estas ações alternativas tendem a ser menos onerosas que obras de expansão.

Para cada uma das ações de operação e manutenção preventiva foi considerado um efeito diferenciado nos índices de continuidade. Para exemplificar, na obra de religador foi fixado um percentual de redução na taxa de falhas dos alimentadores. Já para o acréscimo de equipes, considerou-se um tempo de restabelecimento inferior.

No planejamento clássico, problemas referentes às transgressões dos indicadores de continuidade de conjunto (DEC e FEC) são tratados através das obras que atendem também a expansão do mercado.

Com os resultados apresentados a partir das simulações efetuadas, verificou-se a eficácia de se investir em ações de operação e manutenção do que expandir a rede de distribuição primária.

No modelo proposto por Vuinovich *et al.* (2004), uma estratégia de planejamento dinâmico foi apresentado, onde este divide o horizonte de planejamento em subintervalos, e realiza otimização multiobjetivo (MO) para cada subintervalo, utilizando *Nondominated Sorting Genetic Algorithm* (NSGA). O menor custo de transição entre duas soluções ótimas é então encontrado utilizando o algoritmo de Pesquisa Colônia de Formiga (ACS).

A qualidade da energia e a confiabilidade são incluídas no planejamento, considerando o número esperado de quedas/ano e interrupções/ano como objetivos, próximo ao custo total.

Foi adotada uma abordagem baseada em “módulos funcionais” para construção do modelo matemático que fosse adequado para a otimização, permitindo assim que seja otimizada a configuração do sistema tanto no plano da MT quanto na BT.

Estes “módulos funcionais” são compostos por um módulo elementar de sistema de potência e um número de restrições que definem o seu funcionamento e articulação com outros módulos. O módulo de sistema elementar é dado por um nó de abastecimento, uma série de alimentadores de saída e dispositivos de compensação, caso estejam presentes.

Para resolver o problema MO dinâmico, o horizonte de planejamento total é dividido em sub-períodos. No final de cada um destes, um problema MO estático é realizado utilizando NSGA, e um conjunto de configurações ótimas para a densidade de carga esperada naquele ano é encontrado. O problema de planejamento dinâmico é saber como passar de uma configuração inicial, que é ótima, para aquela densidade de carga inicial, para a configuração ótima no horizonte de planejamento total, através de soluções ótimas identificadas para cada sub-período. O ACS é usado para localizar a trajetória de mínimo custo.

A estratégia proposta leva a economias significativas quando comparada a uma aproximação estática, onde o sistema é projetado para a carga prevista para o final do horizonte temporal.

No trabalho de Aguiar (2005), foi apresentada uma comparação entre os diferentes paradigmas de planejamento de sistemas de distribuição seguidos pelas concessionárias do setor elétrico.

O planejamento tradicional é definido como sendo um planejamento que segue as seguintes premissas: atendimento a todos os novos consumidores, todos os novos projetos devem atender as normas técnicas da empresa, e os custos de longo prazo devem ser

minimizados. Em contradição a esta teoria, são apresentados novos paradigmas de planejamento.

Os novos paradigmas de planejamento são formulados a partir de uma combinação da análise marginal de benefício/custo, da definição de uma alternativa base para a comparação das demais opções de investimento, e da adição da valoração da qualidade do serviço (através de índices de desempenho da rede) à avaliação econômica no planejamento. Estes ajustes são necessários para que as concessionárias se moldem à nova realidade do setor elétrico, onde são exigidos do Órgão Regulador investimentos cada vez mais “eficientes”, onde a relação entre qualidade e os investimentos necessários no segmento da distribuição de energia elétrica fica cada vez mais restrita.

Em Mendonza, García e Bernal-Agustín (2006) foi apresentada a aplicação de uma versão melhorada do NPGA para realizar a configuração de sistemas de distribuição a partir de um problema MO, sendo este formulado para encontrar um tamanho sub-ótimo e o *layout* das subestações e alimentadores, sendo expressos por um problema de otimização MO minimizando dois objetivos: o custo da rede e a ENS. Este algoritmo tem o objetivo de obter um conjunto de soluções viáveis pela consideração de algumas restrições técnicas.

Os conceitos a respeito da otimalidade de Pareto são usados como uma ferramenta fundamental para o desenvolvimento do algoritmo aplicado. Os resultados apresentados mostram que o algoritmo NPGA é uma ferramenta adequada para localizar o *layout* de um sistema de distribuição.

O trabalho escrito por Gaulke (2007) teve como objetivo desenvolver uma metodologia para otimização MO das ações de corte de carga em sistemas de distribuição de energia elétrica. Este problema enquadra-se no planejamento da operação de sistemas de distribuição, tendo algumas semelhanças com o planejamento da expansão, por exemplo: utilização de múltiplos objetivos a serem alcançados simultaneamente, para que ambos os problemas sejam resolvidos de forma adequada e apresentem os resultados eficazes; minimização do efeito de contingências na rede de distribuição, proporcionar ganhos a concessionária; melhorar a qualidade do fornecimento aos consumidores.

A metodologia proposta é composta por dois módulos. O primeiro procura obter a tensão ótima de despacho na saída dos alimentadores das subestações, que se encontram na área de solicitação do corte de carga, para minimizar a necessidade de desligamentos. Após a tentativa de reduzir a necessidade de corte utilizando-se o controle de tensão nas

subestações, o segundo módulo é responsável pela indicação do conjunto de alimentadores que deve ser desconectado da rede de distribuição para completar a redução na demanda solicitada. Devido à necessidade de otimizar vários critérios simultaneamente neste módulo, foi utilizado o AG por se tratar de uma alternativa interessante para solução deste tipo de problema.

A primeira metodologia proposta utiliza como base um algoritmo genético básico (SGA), diferenciando-se pelo emprego de um processo de avaliação multi-critério para proceder ao 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 de todos os critérios.

O segundo método é composto por um algoritmo genético que incorpora os princípios da otimização multi-critério 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 multi-critério utilizada para o SGA, encontra-se um conjunto de soluções de corte de carga, classificadas de acordo com a pontuação recebida nessa avaliação. Todas são soluções da fronteira da 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.

Os múltiplos critérios utilizados neste trabalho foram: DEC (Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora), FEC (Freqüência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora), DIC (Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora), FIC (Freqüência de Interrupção Individual por Unidade Consumidora), END (Energia Não Distribuída) e prioridade das cargas. A partir da análise dos resultados apresentados, foi possível verificar que os objetivos propostos no início do trabalho foram alcançados.

2.2 Considerações Finais do Capítulo

Neste capítulo foram descritos os alguns trabalhos desenvolvidos e publicados no que diz respeito ao planejamento de sistemas de distribuição com a utilização de inteligência artificial, fazendo referência principalmente à expansão destes. No final é realizada uma descrição do problema de planejamento operação de sistemas de distribuição, comparando-o com o planejamento da expansão, a fim de se verificar as semelhanças existentes, bem como a aplicabilidade das técnicas de AG nos mesmos.

A partir dos resultados apresentados, verificou-se que o AG será a ferramenta mais adequada a ser utilizada neste trabalho, principalmente devido à natureza discreta deste e à facilidade de trabalhar com múltiplos critérios.

Avaliando os trabalhos no que diz respeito à priorização de investimentos em redes de distribuição utilizando AG, concluiu-se que as teorias aplicadas para a obtenção da fronteira de Pareto, seguindo os critérios do problema, será o método mais adequado para que os melhores resultados sejam obtidos.

CAPÍTULO

3

ALGORITMOS GENÉTICOS

Algoritmos Genéticos (AG's) são programas evolutivos inspirados na Teoria de Seleção Natural. Eles operam sobre uma população de indivíduos, baseados no fato de que aqueles com melhores características genéticas têm maiores chances de sobrevivência e de produzirem descendentes cada vez mais aptos, enquanto os indivíduos menos aptos tendem a desaparecer. Alguns de seus principais conceitos, como terminologia, características gerais, estrutura básica, operadores genéticos e uma idéia geral dos Algoritmos Genéticos de Pareto serão tratados neste capítulo.

3.1 Introdução

As técnicas de computação evolucionária estão inseridas na grande área da Inteligência Artificial, utilizando modelos dos processos naturais de evolução como uma ferramenta para resolver problemas. Estas técnicas operam sobre vários indivíduos simultaneamente, diferentemente das técnicas de otimização tradicionais, que manipulam apenas um. Existem várias técnicas de computação evolucionária, sendo as mais conhecidas: Estratégias Evolutivas, Programação Evolutiva e os Algoritmos Genéticos.

Os algoritmos genéticos (AG), que foram inspirados em mecanismos de genética e seleção natural, segundo a teoria da evolução das espécies, proposta por Charles Darwin, têm os seus fundamentos teóricos desenvolvidos por J.H. Holland em 1975 (Holland, 1975).

Os AG's são algoritmos que funcionam de acordo com a Teoria da Seleção Natural. Eles operam sobre uma população de indivíduos baseado na afirmação de que os melhores indivíduos desta população (com boas características genéticas) têm maiores chances de repassarem suas características com o passar do tempo. Estes algoritmos trabalham com regiões mais prósperas do espaço de busca (Galvão e Valença, 1999).

Definindo os AG's de outra forma, pode-se dizer que estes são algoritmos de busca baseados nos mecanismos de seleção natural e genética. Eles combinam a sobrevivência entre os melhores com uma forma estruturada de troca de informação genética entre dois indivíduos para formar uma estrutura heurística de busca (Linden, 2006).

Os AG's são técnicas heurísticas de otimização global. Isto opõe os mesmos aos métodos como gradiente, que seguem as derivadas de uma função de forma a encontrar o máximo de uma função, ficando facilmente retidos em máximos locais, como pode ser verificado na figura 3.1. (Linden, 2006).

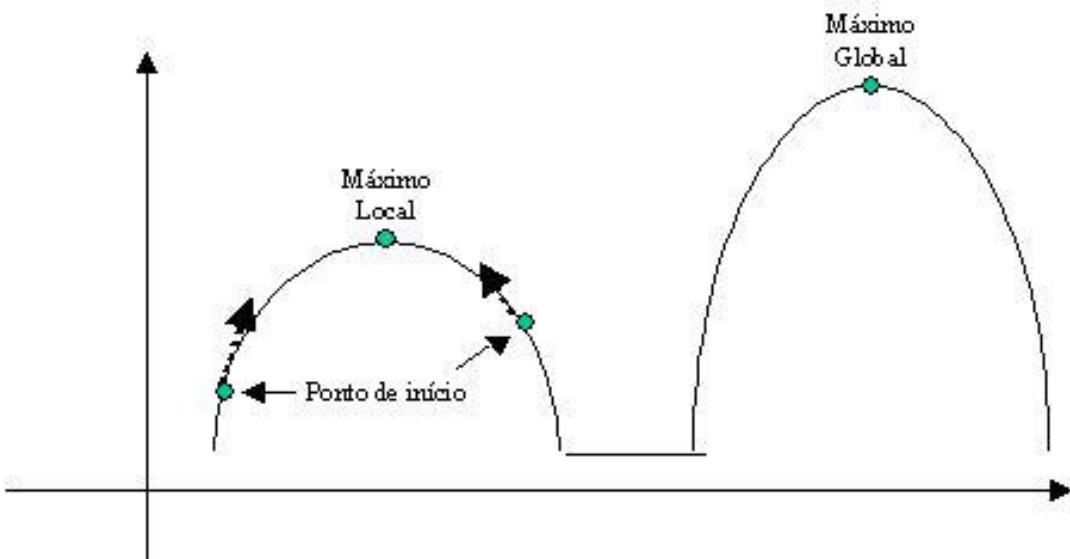


Figura 3.1 – Função hipotética com um máximo local e outro global (Linden, 2006).

Na técnica de gradiente, caso a pesquisa seja iniciada na região do pico mais baixo, esta técnica buscará a direção de maior crescimento, e acabará encontrando o máximo local (Goldberg, 1997). Os AG's não possuem tanta dependência dos valores iniciais. Esta dependência está relacionada com a taxa de mutação aplicada no algoritmo em questão.

Os AG's funcionam mantendo uma população de estruturas, denominadas “indivíduos” ou “cromossomos”, que se comportam de forma semelhante à evolução das espécies. Estas populações de indivíduos são criadas e submetidas aos operadores genéticos: seleção, recombinação (*crossover*) e mutação. Estes operadores utilizam uma caracterização da qualidade de cada indivíduo como solução do problema, chamada de avaliação. Com base nesta avaliação, são aplicados os operadores genéticos de forma a simular a sobrevivência dos indivíduos mais aptos, havendo então a troca de informação genética entre os indivíduos para formar uma estrutura heurística de busca (Pacheco, 1999).

Deve-se salientar que os AG's não são algoritmos de busca da solução ótima de um problema, mas sim, uma heurística que encontra boas soluções a cada execução, não sendo necessariamente a mesma todas as vezes que este for executado (Linden, 2006).

Normalmente, cada indivíduo do AG corresponde a uma resposta para um determinado problema. Uma ferramenta de reprodução é aplicada sobre a população atual com o objetivo de explorar a região de busca.

Os AG's se diferenciam de outros métodos de otimização em quatro pontos (Goldberg, 1989):

- Trabalha com a codificação de um conjunto de parâmetros;
- Trabalha com um espaço de busca onde estão todas as possíveis soluções, e não com um único ponto;
- Utiliza informação da função objetivo, chamada de função aptidão, também conhecida por função de avaliação, e não de derivadas ou outro conhecimento auxiliar;
- Utiliza regras de transição probabilística, e não determinística.

A codificação da informação em cromossomos é um ponto crucial dentro dos AG's, e é, junto com a função de avaliação, o que liga estes ao problema a ser resolvido. Se a codificação for feita de forma inteligente, esta já incluirá as características do problema, e permitirá que se evitem testes de viabilidade de cada uma das soluções geradas. Ao fim da execução do algoritmo, a solução deve ser decodificada para ser utilizada na prática (Linden, 2006).

A reprodução e a mutação são aplicadas em indivíduos selecionados dentro da população em questão. A seleção é realizada seguindo a teoria de que os indivíduos mais aptos da geração atual são escolhidos, de forma que as boas características destes sejam repassadas para as populações posteriores pela reprodução destes indivíduos. Para aumentar a diversidade e evitar uma convergência genética prematura, é utilizado o operador de mutação para que alguns indivíduos da população correntes sofram alterações nas suas características genéticas (Pacheco, 1999).

3.2 Terminologia

Os AG's foram estruturados de forma que as informações referentes a um determinado sistema possam ser codificadas de maneira análoga a dos cromossomos biológicos. Desta forma, estes algoritmos se assemelham muito ao processo evolutivo dos seres vivos.

O cromossomo biológico é composto de genes, os quais são responsáveis por uma determinada característica do indivíduo. Através de uma analogia, é possível construir um cromossomo “artificial”, onde cada gene representará um determinado parâmetro que deve

ser otimizado. Seguindo esta teoria, o meio onde estão inseridos estes cromossomos é responsável por selecionar aqueles que são mais aptos a gerar uma nova descendência, passando, então, suas características às populações futuras, e os menos aptos tendem a ser eliminados com o tempo. Durante o processo de reprodução, alguns operadores genéticos são aplicados sobre as informações genéticas contidas nos cromossomos, fazendo com que haja uma variedade genética entre os indivíduos da população atual (Sobrinho e Girardi, 2003).

Os AG's sofrem influência da biologia em suas definições, explicando então muitos termos semelhantes utilizados por estes métodos (Galvão e Valença, 1999).

A terminologia da biologia que é adotada pelos estudiosos da área de computação, com os seus respectivos significados do ponto de vista dos AG's são descritos a seguir:

- ⇒ GENE: Parâmetro codificado no cromossomo. Característica do indivíduo;
- ⇒ ALELO: Valor da característica;
- ⇒ CROMOSSOMO: Estrutura de dados que codifica uma solução com relação a um determinado problema;
- ⇒ GENÓTIPO: Informação característica de uma solução. Estrutura do cromossomo;
- ⇒ FENÓTIPO: Decodificação do cromossomo, relacionado a um genótipo que forma uma estrutura ou organismo. Conjunto de parâmetros do cromossomo;
- ⇒ INDIVÍDUO: Possível solução de um problema;
- ⇒ POPULAÇÃO: Conjunto de possíveis soluções (indivíduos) no espaço de busca;

GERAÇÃO: Iteração completa do AG, onde ao final se produz uma nova população de indivíduos.

3.3 Características Gerais

Os AG's são considerados como sendo técnicas probabilísticas, isto porque quando se tem um mesmo conjunto de parâmetros e população inicial, pode-se encontrar soluções diferentes cada vez que o mesmo é executado. Estes programas são relativamente simples de serem formulados, pois não necessitam de derivadas ou qualquer outra informação para serem executados, fazendo com que sejam extremamente aplicáveis a problemas do mundo

real. Eles empregam uma estratégia de busca estruturada e paralela, mas aleatória, que é voltada em direção de pontos de alto valor da função de aptidão, ou seja, pontos nos quais a função a ser minimizada (ou maximizada) têm valores relativamente baixos (ou altos). (Carvalho, 2003; Linden, 2006).

Mesmo os AG's sendo aleatórios, estes caminham de forma direcionada, pois exploram informações históricas para tentar seguir na direção correta e encontrar novos pontos de busca, onde são esperados melhores desempenhos no decorrer de processos iterativos (gerações). Esta exploração é realizada através do uso do valor da função de avaliação (função aptidão) para orientar na seleção dos pais. Vale salientar que os AG's trabalham através da codificação de seus parâmetros, sendo necessária a definição de um esquema de codificação e decodificação dos mesmos, equivalendo então à representação cromossomial.

O esquema de codificação mais utilizado na atualidade é o binário, por ser uma codificação simples e de fácil manipulação e análise, que foi introduzido por John Holland (Holland, 1975). Uma desvantagem deste tipo de codificação é que, em se tratando de parâmetros contínuos, caso se deseje uma alta precisão dos valores a serem obtidos, será imprescindível a utilização de indivíduos extensos para representar as soluções (Rezende 2003).

Toda a informação relativa ao problema está contida na função de avaliação, que embute os módulos de codificação e decodificação dos parâmetros. Assim, um mesmo AG pode ser utilizado para uma infinidade de problemas, sendo necessário apenas mudar a função de avaliação, o que pode gerar uma grande economia de tempo e dinheiro para as organizações (Spears *et al.*, 1993).

Os operadores genéticos são necessários para que, a partir de uma dada população, sejam produzidos novos indivíduos que melhorem sua função de aptidão com o passar das gerações. O conceito básico dos operadores genéticos é fazer com que a população, através de sucessivas gerações, estenda a busca até chegar a um resultado satisfatório.

A grande utilidade dos operadores genéticos é diversificar a população e manter as características de adaptação adquiridas pelas gerações anteriores. São eles: seleção, *crossover* (ou cruzamento) e mutação. Estes são utilizados para garantir que a geração posterior seja completamente nova mas tenha características de seus pais, ou seja, a população se diversifica e mantém algumas características adquiridas pelas gerações

anteriores. Para garantir que os indivíduos de melhor avaliação sejam preservados de uma geração para outra, pode ser utilizado o esquema de reprodução elitista.

3.4 Estrutura Básica dos AG's

A estrutura básica dos algoritmos genéticos é apresentada na figura 3.2. Nesta, observa-se que cada iteração corresponde à aplicação de quatro operações: cálculo de aptidão, seleção, *crossover* e mutação. Ao final destas operações, cria-se uma nova população, esperando que seja adquirida uma melhor aproximação da solução do problema em questão que a população anterior.

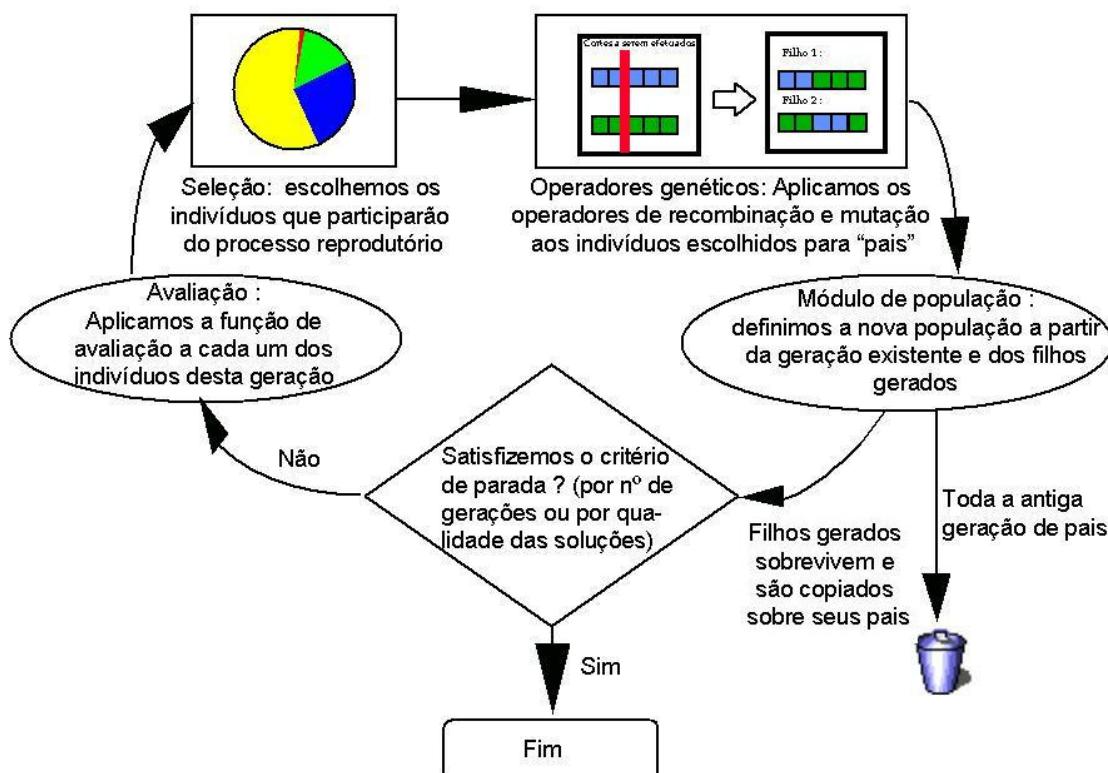


Figura 3.2 – Esquema de um algoritmo genético (Linden, 2006).

Com o passar das gerações, a população atual é avaliada: para cada indivíduo é dado um índice através do cálculo da aptidão pela função de avaliação, que determina a qualidade de um indivíduo como solução do problema em questão. Os indivíduos que possuem uma alta aptidão devem ser priorizados, sem desprezar completamente aqueles com função de avaliação extremamente baixa. A este fenômeno dá-se o nome de seleção.

Os membros mantidos por esta seleção sofrem modificações em suas características, através de recombinações e mutações, gerando descendentes para a geração seguinte, a qual apresenta uma melhor aproximação da solução do problema de otimização que a população anterior. Esse processo é repetido até que um conjunto de soluções satisfatórias, dado normalmente pelo valor da função de avaliação do melhor indivíduo, em conjunto com a limitação do número de gerações ou tempo de simulação ou uma tolerância de erro admissível seja encontrado, caracterizando a convergência do algoritmo.

Embora possam parecer simples do ponto de vista biológico, esses algoritmos são suficientemente complexos para fornecer mecanismos de busca adaptativa poderosos e robustos (Goldberg, 1989).

3.5 Operadores Genéticos

O principal objetivo dos operadores genéticos é transformar a população através de sucessivas gerações, buscando melhorar a aptidão dos indivíduos, estendendo a busca até chegar a um resultado satisfatório. Os mesmos são necessários para que a população se diversifique e mantenha as “boas características” adquiridas com o passar das gerações. Basicamente, os AG’s realizam quatro operações: cálculo da função de avaliação (aptidão do indivíduo), seleção, *crossover* (recombinação) e mutação.

3.5.1 Função de Avaliação (aptidão)

Deve-se encontrar o valor associado ao desempenho de cada cromossomo, relacionado ao sistema de interesse. A resposta de cada cromossomo é o resultado mais importante no procedimento do algoritmo genético.

A resposta (aptidão) é uma característica intrínseca ao indivíduo. Esta indicará qual o nível de habilidade que um indivíduo possui para sobreviver e poder transmitir o seu material genético de uma geração para outra. Transportando para o algoritmo matemático, seria sua habilidade de produzir a melhor resposta.

Em alguns algoritmos, é a resposta que irá determinar qual a probabilidade com que um determinado cromossomo irá passar pelo processo de *crossover*. Desta forma, determinados indivíduos poderão realizar mais de um cruzamento durante a mesma geração.

A função de avaliação deve ser escolhida com bastante cuidado. Ela deve embrutar todo o conhecimento que se possui sobre o problema a ser resolvido, tanto suas restrições quanto suas qualidades. Ela deve fazer a diferenciação entre duas soluções sub-ótimas, deixando claro qual delas está mais próxima da solução procurada.

3.5.2 Seleção

Os AG's comumente desenvolvidos utilizam uma quantidade fixa de indivíduos em sua população com o passar das gerações. É imprescindível que alguns indivíduos sejam selecionados para que suas características genéticas sejam repassadas, onde os mais aptos têm maior probabilidade de reproduzir e, os menos aptos, menor.

Com isso, é necessário a aplicação de um operador de seleção com o objetivo de escolher os indivíduos que passarão pelo processo de *crossover* e mutação. De forma simplista, pode-se definir este operador como sendo o processo em que um conjunto de indivíduos é selecionado de acordo com o valor de suas respectivas funções de avaliação (Goldberg, 1989).

Devido a isto, para que os indivíduos com maior aptidão sejam privilegiados durante este processo, cada membro da população recebe um *score*, dado pela função de avaliação, que recebe os valores do gene do indivíduo como dados de entrada e fornece a sua aptidão como resultado. Pode-se dizer que esta aptidão é uma nota dada ao indivíduo que diz quão boa é a solução correspondente a um indivíduo, sendo esta própria para cada problema a ser tratado.

Durante o processo de seleção, depois de calculada a aptidão de cada indivíduo da população corrente, é selecionado um subconjunto de indivíduos para gerar uma população intermediária. Muitos métodos têm sido utilizados, porém os que possuem maior aceitação são: a Roleta Viciada, o Torneio e a Amostragem Estocástica Uniforme (Coelho, 2003; Rezende, 2003).

3.5.2.1 Roleta Viciada

No Método da Roleta Viciada, a probabilidade de um determinado indivíduo ser selecionado é proporcional ao valor da sua função de avaliação (a soma dos pedaços não pode superar 100%). De forma simplificada, a seleção ocorre da seguinte forma: é realizado um sorteio de forma aleatória em uma roleta virtual, onde as áreas específicas de

cada indivíduo são proporcionais os respectivos valores calculados pela função de avaliação. Estes valores calculados não podem ser negativos, pois os mesmos representarão uma determinada região da roleta (Szuvovivski, 2008).

A roleta deve ser girada um número de vezes igual à quantidade de indivíduos da população, e, consequentemente, aqueles com um maior valor de aptidão possuem maior probabilidade de serem escolhidos para participarem dos processos de *crossover* e mutação. Um exemplo da Roleta Viciada pode ser visto na figura 3.3.

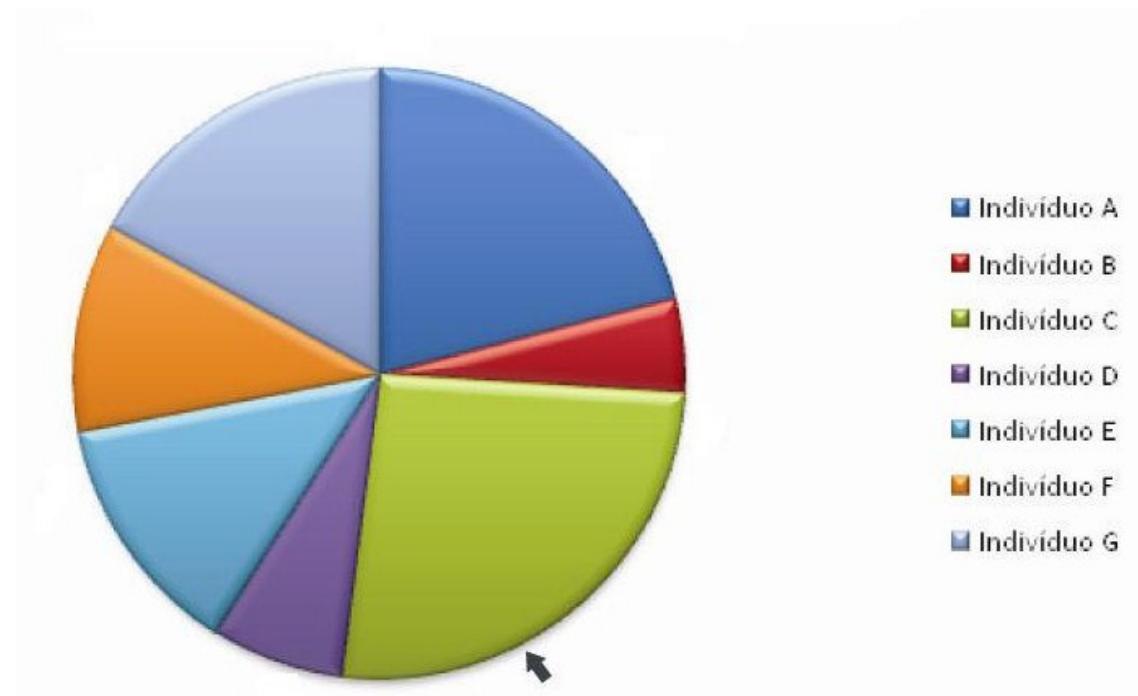


Figura 3.3 – Método da roleta viciada

3.5.2.2 Torneio

O Método do Torneio consiste na seleção aleatória de n indivíduos da população, onde os selecionados para a população intermediária são aqueles com maiores aptidões. Após o preenchimento da população intermediária, o processo é concluído. Normalmente são utilizados 2 ou 3 indivíduos na disputa do torneio.

Não existe qualquer favorecimento para os melhores indivíduos, como no caso da Roleta Viciada. A única vantagem é que, se selecionados, os indivíduos mais aptos sempre vencerão o Torneio. Isso permite que não sejam gerados super-indivíduos, sendo iguais as chances do melhor e pior indivíduos serem selecionados (Linden, 2006).

Na Roleta Viciada, a comparação é realizada entre todos os indivíduos. Já no Torneio, a comparação é feita entre k indivíduos, onde k é o tamanho do torneio.

O método do Torneio pode ser exemplificado a partir da figura 3.4.

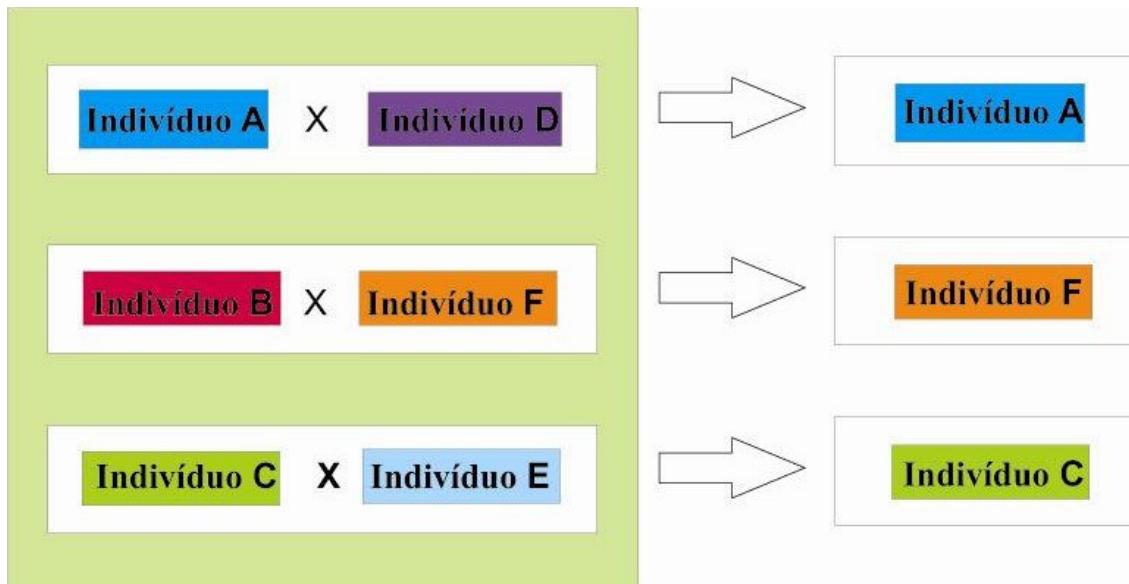


Figura 3.4 – Método do Torneio

Neste exemplo, os indivíduos 1, 3 e 5 serão responsáveis pela formação da população intermediária, onde estes passarão pelos processos de *crossover* e mutação para gerar a nova população.

3.5.2.3 Amostragem Estocástica Uniforme

Neste método, todos os indivíduos são mapeados para segmentos contíguos de uma linha, sendo que o tamanho de cada segmento é proporcional ao valor da avaliação do indivíduo que está sendo mapeado.

Neste ponto, para selecionarmos os n indivíduos que serão pais nesta geração, é sorteado um número i entre 0 e $1/n$, que serve como base do sorteio. Depois são atribuídos n ponteiros que passam a apontar para segmentos de reta, nas posições $i, i + 1/n, i + 2/n, \dots, i + (n - 1)/n$. Os indivíduos “donos” dos segmentos apontados serão então selecionados para aplicação dos operadores genéticos (Linden, 2006). Podemos ver um exemplo da operação deste método de seleção na figura 3.5.

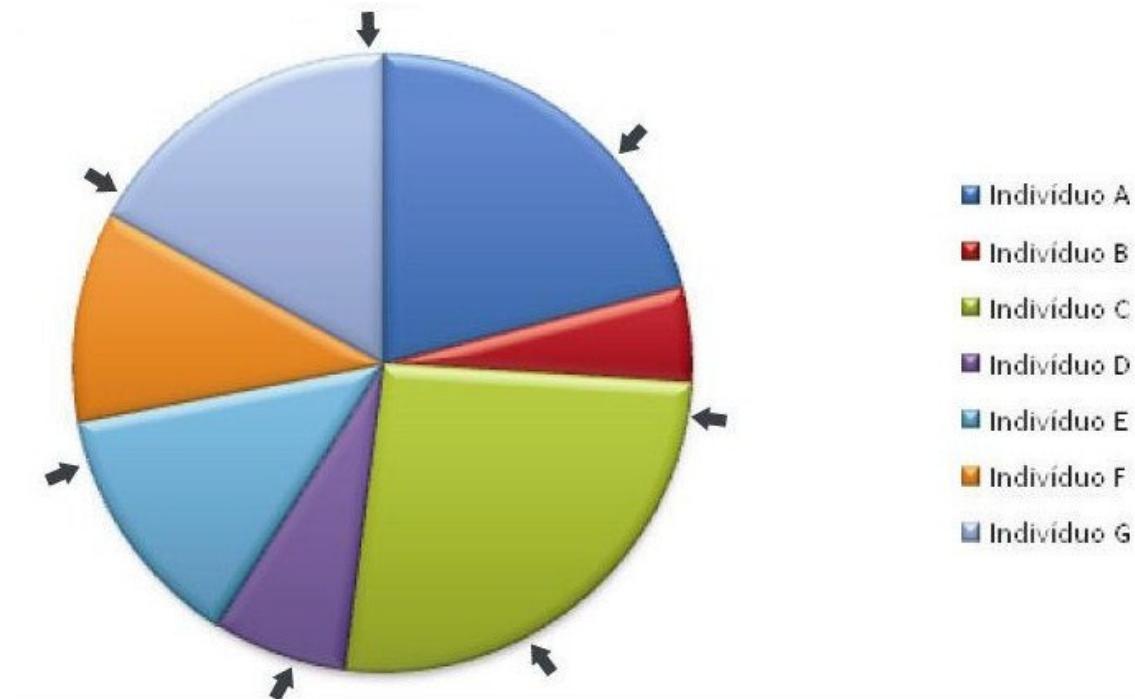


Figura 3.5 – Método da amostragem estocástica uniforme

Os indivíduos que possuem maiores regiões terão maior probabilidade de serem selecionados mais de uma vez. Devido a isto, a seleção de indivíduos pode possuir vários indivíduos iguais, enquanto outros podem não aparecer.

3.5.3 Crossover

Representa a permuta entre o material genético de diferentes indivíduos. A partir de uma população inicial, uma nova população é formada pelo cruzamento entre os cromossomos. Portanto, os filhos recebem informações de seus genitores, através do material genético proveniente deste cruzamento (Filho, 1998).

Durante a permuta do material genético entre os indivíduos, haverá uma tendência de que os indivíduos que possuem características dominantes transmiti-las para as gerações futuras. Após algumas gerações, pode-se observar que uma elevada taxa dos indivíduos possui a presença de variáveis “dominantes”. O cruzamento é a etapa responsável pela convergência, levando para a situação de otimização desejada.

O processo de *crossover* dá-se pela escolha aleatória dos indivíduos e da posição onde ocorrerá a ruptura seguida pela troca de material genético. O número de rupturas geralmente varia entre 1 e 2. Isto se deve ao fato de que quanto maior for o número de rupturas, menor será a semelhança entre os pais e filhos, dificultando a convergência.

3.5.3.1 Crossover com um ponto

É feita uma seleção de forma aleatória a um ponto de corte do cromossomo. A partir deste, é feita a troca de material genético entre os indivíduos, gerando, então, dois novos descendentes (filhos), onde cada um destes possuem informações cromossômicas de cada um dos pais, como apresentado na figura 3.6.

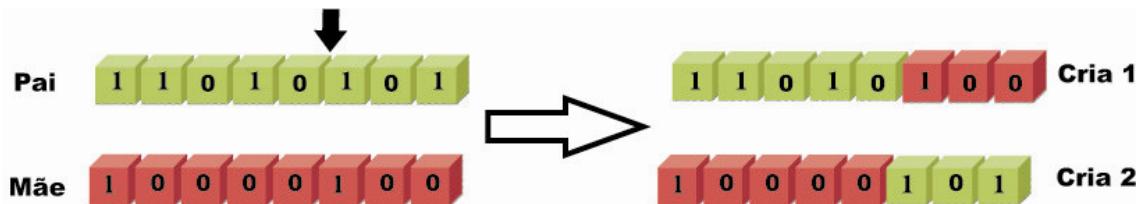


Figura 3.6 – Cruzamento com um ponto de corte

3.5.3.2 Crossover com dois pontos

O funcionamento do *crossover* com dois pontos ocorre de maneira similar ao de um ponto, ou seja, são selecionados de forma aleatória dois pontos de corte no cromossomo. A partir destes, é feita a troca de material genético entre os indivíduos, gerando dois novos descendentes. O primeiro filho será formado pela primeira e terceira parte do primeiro e pela segunda parte do segundo pai. O segundo filho é formado pelas partes restantes. A representação deste processo é apresentada na figura 3.7.

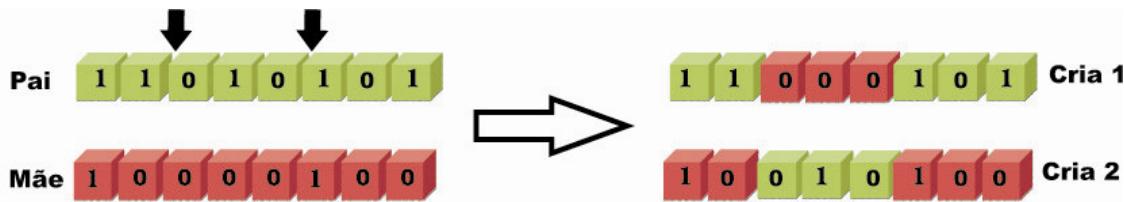


Figura 3.7 – Cruzamento com dois pontos de corte

3.5.3.3 Crossover Uniforme

O *crossover* uniforme pode ser descrito da seguinte forma: para cada gene é sorteado um número zero ou um. Se o valor sorteado for igual a um, o filho número um recebe gene da posição corrente do primeiro pai e o segundo filho o gene corrente do segundo pai. Por outro lado, se o valor sorteado for zero, as atribuições serão invertidas: o primeiro filho recebe o gene da posição corrente do segundo pai e o segundo filho recebe o gene corrente do primeiro pai (Linden, 2006). Este processo pode ser visto na figura 3.9.

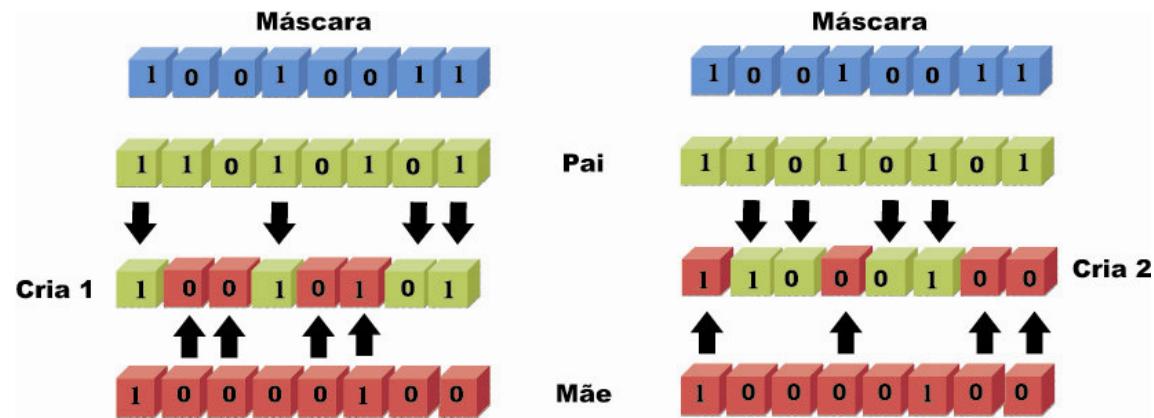


Figura 3.8 – Cruzamento uniforme

3.5.4 Mutação

Durante o processo de reprodução, pode ocorrer uma perturbação das informações contidas dentro dos genes, ocorrendo uma mutação.

A mutação promove alterações no código genético de uma pequena parcela da população, onde muitas vezes pode atuar de forma benigna. Se a alteração gerar características melhores, estas serão transmitidas para os demais indivíduos ao longo das próximas gerações.

A mutação ajuda a solucionar o problema do confinamento a mínimos locais, pois promove alterações que direcionam a pesquisa para fora desta região. A figura 3.10 representa um cromossomo, onde ocorreu mutação no material genético do mesmo. A mutação, na representação binária, é realizada pela troca de um por zero e vice-versa.

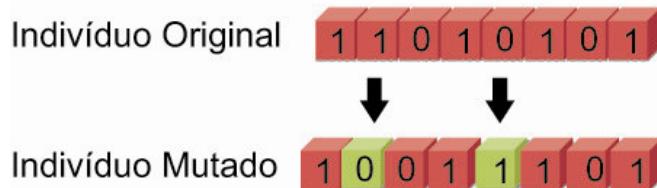


Figura 3.9 – Mutação

3.6 Algoritmo Genético de Pareto

Vários problemas do nosso cotidiano possuem vários objetivos a serem alcançados, onde estes podem ser conflitantes entre si, ou seja, para que um ou mais objetivos melhorem, um ou mais destes precisarão priorar.

Pode-se citar como exemplo de um problema de objetivos conflitantes, o projeto da reforma de uma linha de distribuição de uma determinada concessionária, onde se deseja minimizar o custo desta e maximizar a sua confiabilidade (redução dos índices de Duração Equivalente de Interrupções por Consumidor – DEC, e Freqüência Equivalente de Interrupção por Consumidor – FEC), a partir de várias medidas, considerando obras de reforma propriamente dita (recondutoramento, por exemplo) e ações de operação e manutenção (aumento do número de equipes de manutenção, podas de árvores, etc.).

Para o problema descrito acima, existem várias decisões (soluções) viáveis a serem tomadas pela concessionária. Tais soluções são consideradas ótimas por não existir nenhuma outra solução (ou soluções) melhor do que elas no espaço de busca, quando todos os objetivos são considerados simultaneamente. Estas soluções são conhecidas por **soluções ótimas de Pareto**. O conjunto destas soluções é denominado **conjunto de Pareto** (Cheng e Li, 1997).

Segundo Vilfredo Pareto, uma determinada solução é considerada ótima se não for possível melhorar a mesma, ou, mais genericamente, a utilidade de um agente (critério) sem degradar a solução de qualquer outro. Numa estrutura ou modelo de um determinado problema, podem coexistir diversos ótimos de Pareto. (Pareto, 1984).

Então, de acordo com a teoria de otimalidade de Pareto, nenhuma solução que tenha menor custo e confiabilidade pode ser considerada como “melhor”, se comparada com outra de maior custo e confiabilidade. Entretanto, dentre todas as alternativas de solução, existem algumas que são “melhores” que outras, isto é, apresentam confiabilidade maior ou equivalente por um custo menor ou igual. Estas soluções que superam outras, são conhecidas por **não-dominadas**, enquanto que as que são superadas por pelo menos uma outra, são as **dominadas**. O procedimento para localizar estas soluções é conhecida por **otimização multiobjetivo (MO)** (Linden, 2006).

Na otimização MO, existem duas vertentes para resolução de problemas deste tipo:

- Definir prioridades e/ou pesos entre os objetivos, encontra-se a solução ótima segundo as informações fornecidas a priori;
- Sem nenhuma informação adicional, encontra-se o conjunto de soluções ótimas de Pareto para que, dentre estas, escolha-se uma a posteriori.

Exemplos de métodos do primeiro ponto seriam: Recozimento Simulado, Programação Objetiva ou Métodos Evolucionários, onde se combinam as diversas funções

objetivo dentro de uma única função, obtendo como resultado da otimização uma única solução. Já os métodos evolucionários que abordam o problema pela segunda linha de tratamento, possibilitam a obtenção de um grande número de soluções viáveis (conjunto de Pareto) para uma escolha pessoal posterior (Castro, 2001).

As principais diferenças entre os métodos de otimização clássicos e aqueles que utilizam conceitos da otimalidade de Pareto estão descritos abaixo:

Os métodos clássicos consistem em converter o problema MO em outro de um único objetivo, quer pela agregação de funções objetivo, ou otimizando um objetivo e tratando os outros como restrições (Ngatchou, Zarei e El-Sharkawi, 2005).

O VEGA (*Vector Evaluated Genetic Algorithms*) consiste na modificação da lógica do algoritmo genético básico por meio de um laço no procedimento de seleção original, que faz com que este seja repetido para cada objetivo separadamente até atingir um número pré-definido de indivíduos para cada objetivo para reprodução (Schaffer, 1984).

No MOGA (*Multi-objective Optimization Genetic Algorithm*), este utiliza um procedimento de ordenamento não-dominado, onde toda a população é verificada e os indivíduos não-dominados recebem uma posição ou ordem 1. O restante da população também recebe um determinado posicionamento, sendo o indicador da posição de cada indivíduo igual ao número de indivíduos que o dominam acrescido de uma unidade. Este posicionamento é utilizado no procedimento de seleção para reprodução (Fonseca e Fleming, 1993).

O algoritmo denominado NPGA (*Niched Pareto Genetic Algorithm*) utiliza um procedimento de ordenamento durante a etapa de seleção, que consiste em usar 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 outro 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 certa distância do indivíduo. Ao final, a solução que apresentar o menor contador de nicho é selecionada (Horn, Nafpliotis e Goldberg, 1994).

O NSGA (*Nondominated Sorting Genetic Algorithm*) utiliza um procedimento de seleção por ordenamento, juntamente com um método voltado para criação de nichos, com o intuito de manter a diversidade populacional (Srinivas e Deb, 1994).

No SPEA (*Strength Pareto Evolutionary Algorithm*), este algoritmo funciona com a manutenção de uma população externa de soluções não dominadas a cada geração, caracterizando-se como um filtro dos indivíduos de primeira ordem. Essa população é utilizada normalmente nos cruzamentos entre os indivíduos (Zitzler e Thieler, 1998).

3.7 Considerações Finais do Capítulo

A partir dos comentários colocados neste capítulo, foi possível observar que o AG é uma ferramenta adequada para a resolução de problemas de otimização, particularmente quando não é possível a obtenção do modelo analítico do problema.

As teorias que são aplicadas nestes algoritmos e que foram inspirados em mecanismos de genética e seleção natural fazem com que o mesmo se torne uma boa ferramenta, sendo que os operadores genéticos são imprescindíveis para o bom desenvolvimento do algoritmo, pois estes são responsáveis por melhorar a aptidão dos cromossomos que fazem parte da população corrente, tratando os mesmos até que estes possuam uma função de avaliação satisfatória.

Não se pode deixar de comentar a respeito da função de avaliação: a mesma é responsável por retratar o problema a ser solucionado. Devido a isto, todo o conhecimento que se possuiu sobre este deve ser incluído na função de avaliação, podendo então todos os módulos restantes do AG (seleção, *crossover* e mutação) serem iguais aos de outros problemas.

Em se tratando da resolução problemas de otimização MO, o AG de Pareto possui boa aplicabilidade, devido à facilidade de se trabalhar com vários objetivos simultaneamente, a partir do conceito de soluções dominadas e não-dominadas.

CAPÍTULO
4

***PLANEJAMENTO DA
EXPANSÃO EM SISTEMAS DE
DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA
ELÉTRICA***

Este capítulo apresenta uma breve explanação a respeito da Importância do Planejamento da Expansão de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica, o que motiva as concessionárias a planejar o seu sistema, a função do planejamento, como algumas destas empresas tem realizado o seu planejamento e formas de resolução do problema de planejamento da expansão.

4.1. Introdução

As redes de distribuição de energia elétrica têm uma importância considerável dentro do sistema elétrico de potência, devido às mesmas estarem próximas do consumidor final, exigindo investimentos expressivos neste segmento do sistema elétrico (entre 30% e 50% do custo total do sistema elétrico) (Temraz e Quintana, 1993). Devido a isto, faz-se necessária a realização de um planejamento detalhado e eficiente, visando atender o crescimento da demanda e, ao mesmo tempo, fazendo um uso racional e otimizado dos recursos financeiros.

O planejamento da expansão em redes de distribuição é uma atividade que considera horizontes de curto, médio e longo prazos, para sistemas que atendam áreas relativamente grandes (a área de concessão de uma empresa, uma região, um estado ou país), envolvendo enormes volumes de dados e cálculos de desempenho operacional e de investimentos necessários. Em contraste, o planejamento local estuda a evolução de forma fracionada, por área de interesse como, por exemplo, a rede de uma cidade ou região (Simões, 1998).

As atividades de planejamento da expansão são desenvolvidas a partir de diversos fatos que ocorrem dentro e fora da concessionária. Estes fatos são:

- Crescimento contínuo da demanda, que implica em possíveis sobrecargas nos transformadores, linhas, alimentadores e equipamentos associados, ocasionando aumento da queda de tensão e perdas elétricas, resultando na possível incapacidade do sistema atender aos pedidos de novas ligações, além de ocasionar em cortes de carga;
- Exigências de qualidade por parte dos consumidores, devido à sofisticação tecnológica, obrigando as concessionárias a manter padrões cada vez melhores, que estão relacionados à qualidade da energia elétrica (distorções harmônicas, níveis de tensão e continuidade do fornecimento);
- Questões ambientais, que refletem o lado da sociedade, onde esta tem o interesse em preservar o meio ambiente e melhorar a arborização urbana, propiciando a redução da poluição visual que as redes aéreas produzem, além de exigir garantia de segurança pessoal;

- Aspectos sociais e políticos, que fazem gerar obras voltadas às necessidades básicas da comunidade (iluminação pública, atendimento aos consumidores de baixa renda, etc.) e que procedem do poder público;
- Evolução tecnológica, que coloca a disposição das concessionárias, novas tecnologias em materiais e equipamentos (condutores isolados, protegidos, sistemas de automação de redes, etc.), os quais, na medida em que se consolidam, passam a substituir as redes atuais. As novas metodologias para gerenciar o sistema e a informação também fazem parte deste processo;
- Necessidade de conservação de energia e seu uso racional, que levam à adoção de sistemas e métodos que minimizem as perdas de energia;
- Incertezas do futuro quanto aos aspectos econômicos e de demanda, que levam também à pesquisa de métodos que façam frente a estas questões;
- Esgotamento da vida útil dos equipamentos instalados em seu sistema, que gera a necessidade de sua substituição no tempo certo, juntamente com a expansão do mesmo (Njain, 1995).

4.2. O Problema de Planejamento da Expansão em Sistemas de Distribuição

Levando em conta os pontos descritos na seção anterior, o problema de planejamento da expansão em sistemas de distribuição tem a função de determinar de que maneira as novas cargas/demandas devem ser atendidas, que ações devem ser tomadas para melhorar a qualidade da energia, qual a infra-estrutura será necessária (que tipo/bitola de condutor, estrutura, etc.), que subestações precisam ser ampliadas, qual a capacidade das novas subestações e onde devem se situar, bem como qual a maneira que estes componentes devem ser operados e/ou reformados para atender uma determinada taxa de crescimento da demanda em um determinado período de tempo (Braz et al, 2004), envolvendo também a definição e alocação de determinados equipamentos no sistema.

Este problema é de fundamental importância econômica, onde as ferramentas clássicas de planejamento utilizadas atualmente por algumas empresas do setor prevêem recursos para fornecer um plano indicativo de investimentos otimizado, requerendo a

determinação de soluções de alta qualidade para minimização de custos e viabilização de planos de expansão (Kagan *et al.*, 2004).

As obras/ações propostas nestes planos de expansão, durante o processo de planejamento, devem ser realizadas de forma eficiente, com o menor impacto ambiental e social possível, garantindo também um determinado nível de qualidade no fornecimento de energia (obedecendo a determinados padrões técnicos de atendimento e operação) e economicidade (instalações e perdas), a partir de medidas corretivas que levam em conta as alterações nos hábitos de consumo da população e na evolução tecnológica (Njain, 1995).

Dadas a imensa quantidade de variáveis envolvidas e ainda as variações de configuração que a rede pode ter, devido a características geográficas e a disposição das cargas, o planejamento otimizado de redes de distribuição é considerado um problema relativamente complexo (Boulaxis e Papadopoulos, 2002). Além disso, a escolha simultânea de subestações e alimentadores dentro de diferentes períodos de planejamento cria um problema de dimensão dinâmica, por conta da interação que existe entre esses componentes e também entre vários períodos. Qualquer modificação que seja feita em um elemento da rede afetará a solução global do problema (Blanchard *et al.*, 1996).

Um fator que contribui para o aumento do volume de trabalho dentro do problema de planejamento é a realização de grande número de simulações que consideram diversos cenários econômicos e de mercado, e também políticas alternativas de evolução tecnológica, de mudanças de critérios de planejamento, etc. (Valente, 1997)

De modo a racionalizar a atividade de planejamento em sistema de distribuição, são utilizados modelos de representação das redes de distribuição de forma simplificada, através de parâmetros que substituem a topologia real. Já no planejamento local, utiliza-se a rede real (Simões, 1998).

Estes modelos são utilizados para avaliação de desempenhos das redes quanto a níveis de tensão, carregamento, perdas de confiabilidade, possibilitando a análise do comportamento futuro do sistema (Gouvêa, 1993). É possível, desta forma, a realização de estudos que favorecem a redução significativa do volume de cálculos e de dados envolvidos. Como consequência, reduz-se o tempo de processamento, permitindo que se obtenham respostas mais rápidas, proporcionando maior agilidade ao planejamento.

4.3. Aspectos Técnicos do Planejamento

O nível de tensão de operação é usado normalmente para subdividir o problema de planejamento de sistemas de distribuição. Em primeiro lugar, tem-se o problema das redes de distribuição primária (tensões típicas entre 13,8 a 34,5 kV), e em seguida o das redes secundárias (tensões de 380/220 V) (Costa, 2002). A figura 4.2 mostra de forma simplificada a composição de um sistema de distribuição.

Um ponto interessante e que deve ser levado em consideração neste problema é o fato do mesmo estar sujeito a restrições típicas que restringem o espaço de soluções admissíveis. Estas restrições podem ser:

- Topologia radial,
- Capacidades das linhas e equipamentos, que devem sempre ser respeitadas, sob pena de causar danos às mesmas;
- Limites de queda de tensão, que são estipulados pelo órgão regulador, onde as concessionárias estão passíveis de multa caso não cumpram suas determinações (Resolução 5051, ANEEL);
- Orçamento disponível;
- Características ambientais;
- Melhoria nos índices DEC e FEC (Blanchard *et al.*, 1996),
- Condições de fluxo de potência.

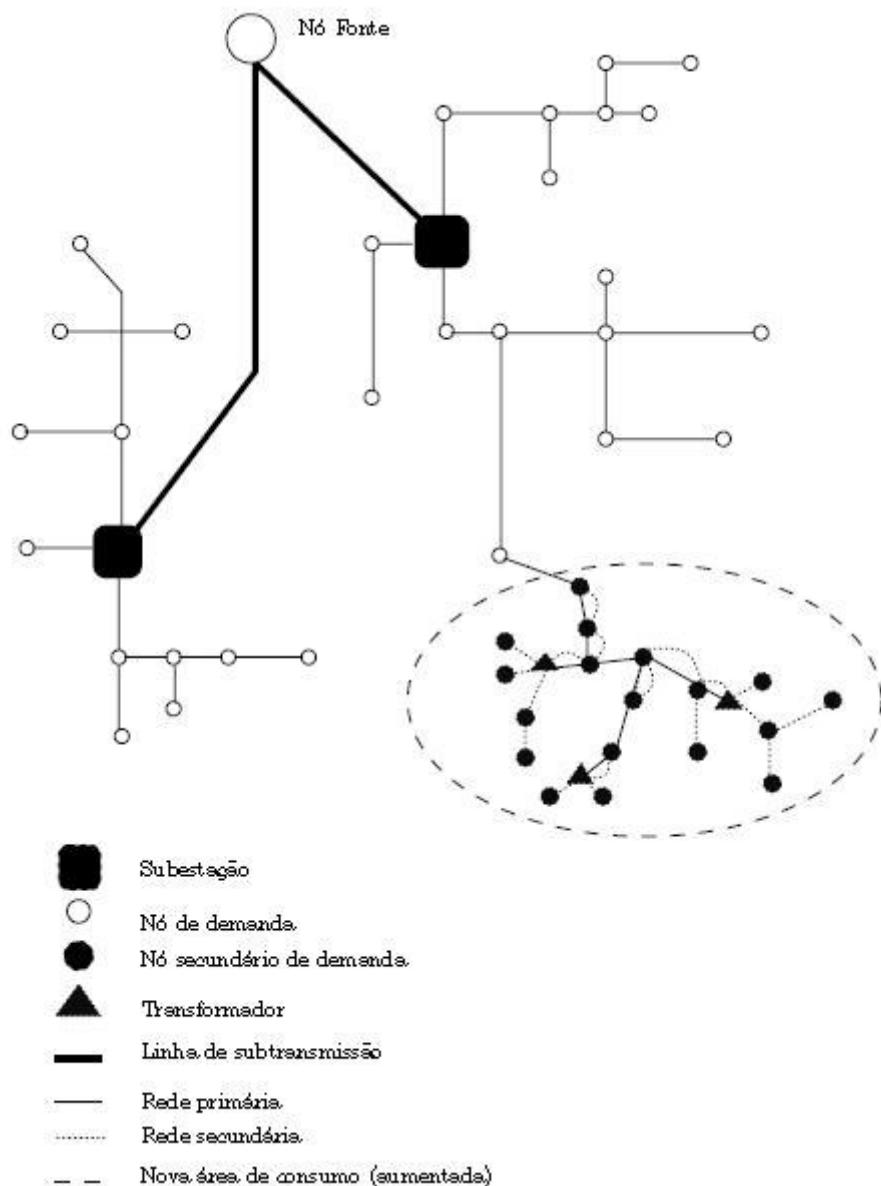


Figura 4.1 – Representação simplificada de um sistema de distribuição (Costa, 2002)

Além destas restrições, outro ponto importante a ser considerado no planejamento é o tipo de rede a ser utilizada, que atualmente possui características diferenciadas quando comparadas com as redes aéreas convencionais. São elas: as **redes protegidas** ou **compactas** e as **redes isoladas** ou **multiplexadas**.

A **rede protegida ou compacta** é uma rede de distribuição de MT que utiliza cabos cobertos em espaçadores, sustentados por cabo mensageiro de aço (com 9,5mm de diâmetro, de alta resistência), apresentando uma configuração compacta.

O cabo é dotado de cobertura protetora de material polimérico, XLPE (composto extrudado de polietileno termofixo), que visa reduzir as correntes de fuga em caso de contato accidental do cabo com objetos aterrados, e diminuir o espaçamento entre os condutores.

Para a sustentação e separação dos cabos, são utilizados espaçadores losangulares, constituídos também de material polimérico, instalados em intervalos de 6 a 8 metros, sendo estes sustentados pelo cabo mensageiro. Cabe lembrar que os cabos protegidos são apenas “encapados”, não podendo ser considerados “isolados eletricamente” por não terem seu campo elétrico confinado. O cabo mensageiro de sustentação é, por sua vez, fixado aos postes através de uma ferragem metálica chamada braço suporte tipo “L”.

As redes compactas aplicam-se, principalmente, em sistemas urbanos de distribuição, onde se deseja atingir níveis de confiabilidade superiores aos das redes convencionais nuas e tenhamos os seguintes problemas:

- desligamentos provocados por interferência da arborização na rede : este padrão de rede permite o toque eventual de galhos, trazendo uma menor área de poda de árvores e possibilitando uma maior periodicidade de manutenção preventiva desta atividade, além do mensageiro servir como anteparo para a queda de galhos;
- saídas de alimentadores de SE's : como alternativa técnico-econômica às redes isoladas multiplexadas ou redes subterrâneas;
- congestionamento de estruturas: pelo diminuto espaço que ocupam, permite-se a instalação de vários circuitos na mesma posteação;
- locais de freqüentes ocorrências de objetos lançados à rede;
- áreas rurais de preservação permanente (Celesc Distribuição, 2009).

Na figura 4.3 é apresentada a saída de alimentadores em rede compacta de uma subestação.

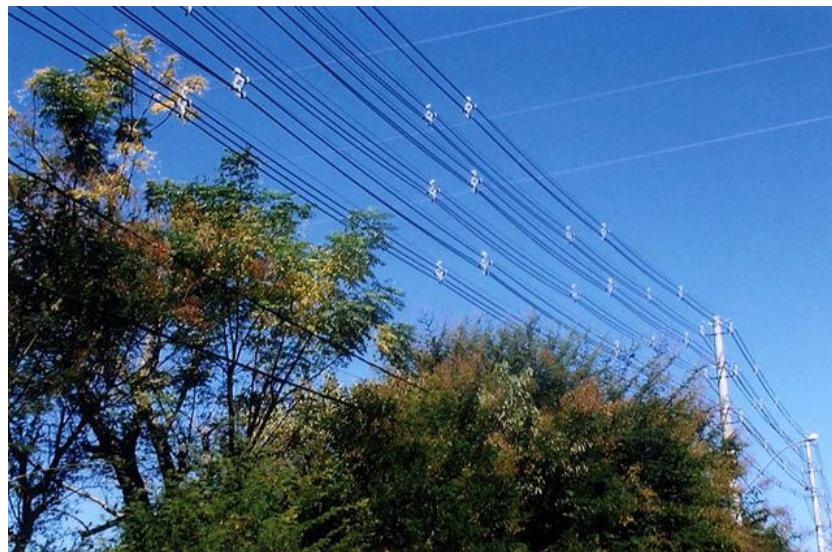


Figura 4.2 – Saída de alimentadores (rede compacta) de uma subestação

A rede de distribuição aérea isolada ou multiplexada utiliza condutores com isolação sólida, blindados, dispostos helicoidalmente em torno de um cabo mensageiro de sustentação. Assim, para compor as redes isoladas, são necessários condutores – cabos de alumínio ou cobre, isolados nas tensões acima de 1 kV até 34,5 kV, com camadas semicondutoras que confinam o campo elétrico em seu interior, acessórios desconectáveis – peças moldadas em borracha EPDM, utilizadas em todas as conexões e derivações da rede e terminações – peças moldadas em bases poliméricas para promover a transição entre os condutores isolados e os condutores das redes nuas ou protegidas (Celesc Distribuição, 2008).

Assim como as redes compactas, as redes multiplexadas oferecem uma maior confiabilidade e qualidade no fornecimento de energia, sendo mais confiáveis que as redes compactas pelo fato destas serem isoladas e as outras apenas protegidas.

Segue abaixo figura com estrutura com três alimentadores, sendo dois em rede multiplexada.



Figura 4.3 – Estrutura com três alimentadores, onde dois são em rede multiplexada

4.4. Técnicas Aplicadas ao Problema

O problema de planejamento da expansão de sistemas de distribuição, segundo a literatura, pode ser resolvido por vários métodos. Dentre esses pode-se listar: algoritmo de busca em grafos, programação dinâmica, programação linear, programação inteira e algoritmos genéticos.

A programação linear é um ramo da pesquisa operacional que permite estabelecer uma proporcionalidade ótima de diversas variáveis, segundo uma função linear de efetividade e satisfazendo um conjunto de restrições lineares para estas variáveis. Pesquisa operacional é uma ciência que objetiva fornecer ferramentas quantitativas ao processo de tomada de decisões, visando alcançar melhores resultados, através da resolução dos aspectos matemáticos dos modelos propostos (Prado, 1999).

O método da programação linear deve observar os seguintes procedimentos para solucionar um problema: definir o problema – para isso é preciso identificar o objetivo pretendido, as variáveis de decisão, ou seja, as variáveis que estão ligadas a este objetivo e, ainda, quais as limitações e relações a que estas variáveis estão sujeitas. O objetivo, em geral, é maximizar ou minimizar um item, observando se os recursos disponíveis são escassos, ou seja, possuem condições restritivas.

O modelo é codificado em uma linguagem simbólica, no caso, através de equações e inequações matemáticas lineares. Dessa forma, o mundo real será representado por um

modelo matemático, permitindo que sobre ele se apliquem técnicas e métodos matemáticos que facilitem a solução do problema (Scalabrin *et al*, 2006).

Definido o problema, é preciso obter a solução deste por meio do modelo construído. Para a solução do mesmo, podem ser utilizados os seguintes métodos: grafo, tentativa e erro, simplex, dentre outros.

No problema de planejamento utilizando algoritmo de busca em grafos, o mesmo é formulado a partir de um problema de busca de caminho de custo mínimo através de um grafo ordenado.

Um *grafo* é caracterizado por um conjunto de *nós* $N = \{n_1, n_2, \dots\}$ e um conjunto de arcos, que são pares ordenados (n_i, n_j) de nós. A cada arco é associado um custo $c(n_i, n_j) \geq 0$.

Um *caminho* é uma seqüência de nós $\eta_i = (n_{i1}, n_{i2}, n_{i3}, \dots)$ ligados dois a dois por arcos, e seu custo é a soma dos custos desses arcos.

Dado um nó inicial $s \in N$ e um conjunto alvo $T \in N$, busca-se entre todos os caminhos que unem s a algum nó de T , um que tenha custo mínimo.

Um algoritmo trivial é o seguinte: liste todos os caminhos possíveis a partir de s e escolha entre os que atingem T um mínimo custo. Bons algoritmos constroem uma lista de caminhos a partir de s , mas somente guardam um caminho entre s e cada nó, o mais barato encontrado. Portanto, os algoritmos guardam listas de caminhos e cada iteração constrói novos caminhos através da expansão do nó terminal de algum caminho listado (Figueiredo e Gonzaga, 2003).

A programação dinâmica é uma técnica matemática que pode ser aplicada a problemas de otimização de múltiplos estágios, onde é possível identificar claramente, em cada um deles, os estados do sistema. Este tipo de programação é um método lógico que pode ser aplicado a um grande número de problemas.

A filosofia básica da programação dinâmica é a eliminação das combinações de estados nos estágios, que conduzem a mesmos estágios e que apresentam maiores custos (para o problema de minimização de custos), ou seja, quando dois estados apresentam a mesma configuração e a mesma evolução futura, os respectivos custos são comparados,

eliminando-se aquele que apresentar os maiores custos até então. Dessa forma, todas as combinações possíveis são avaliadas.

De maneira geral, os problemas de programação dinâmica apresentam características semelhantes e podem ser divididos em diversos estágios, sendo que, em cada um deles, uma decisão estratégica deve ser tomada. Cada estágio tem um número definido de estados possíveis. Dado um estado corrente, a política ótima para os demais estágios é independente da política adotada nos estágios anteriores. Este é o princípio que permite realizar a comparação de alternativas em um determinado estágio (Antunes *et al.* 2004).

De forma equivalente, outros tipos de variáveis não podem ser tratadas diretamente com o uso da programação linear. Programação inteira usa programação linear para resolver problemas sobre variáveis inteiras, mas ainda com funções objetivo e restrições puramente lineares para resolver.

As variáveis inteiras são representadas como variáveis reais no algoritmo de resolução do problema. Então, um processo repetitivo é usado para “delimitar” o valor dessas variáveis em valores inteiros, através da adição de restrições e reprocessamento da solução. Esse método, conhecido como *branch & bound*, finaliza quando todas as variáveis assumem valores inteiros.

Quando o número de variáveis inteiras é pequeno, a programação inteira soluciona o problema rapidamente. Infelizmente, esse procedimento pode consumir muito tempo com um número grande de variáveis inteiras, podendo, em alguns casos, necessitar de milhões de iterações para ser resolvido (www.ilab.com.br/tecnicas.html).

4.5. Priorização de Obras

4.5.1. Objetivo

Segundo a literatura, o planejamento da expansão em sistemas de distribuição tem sido norteado pela necessidade de se realizar obras. Isto acontece para que os critérios de nível mínimo de qualidade (NMQ) sejam atendidos e, também, para que exista uma

conveniência entre a realização das obras e a atratividade do ponto de vista da relação benefício/custo, sempre respeitando um nível preestabelecido de orçamento anual (Kagan *et al.*, 2004).

O NMQ está associado a alguns parâmetros técnicos e políticos, como carregamento e queda de tensão máximas dos alimentadores, DEC e FEC máximos dos mesmos, atendimento a grandes consumidores e questões ambientais.

Os conjuntos de alimentadores são analisados ano a ano, de modo a identificar eventuais transgressões em critérios de NMQ e avaliar os custos e os benefícios de todas as possíveis obras realizáveis, sejam para o atendimento de critérios ou para a melhoria de qualidade ou economicidade.

Com isso, é elaborada uma seleção de todas as obras possíveis e correspondentes parâmetros técnicos e econômicos associados, proporcionando a avaliação do atendimento do NMQ e benefício/custo.

A partir dos conceitos apresentados acima, pode-se definir que o objetivo principal da priorização de obras é indicar quais benfeitorias serão realizadas e quais não o serão, em um determinado período de tempo (Filho, 2003). Basicamente, esta é feita escolhendo-se, dentre as obras geradas com recursos dentro do orçamento anual estabelecido, aquelas que atendem aos critérios técnicos e apresentem os melhores benefício/custo (Kagan *et al.*, 2004).

4.5.2. Priorização de Obras Utilizando AG

O uso de AG para a resolução deste tipo de problema, segundo a literatura, mostrou ser de grande valia, levando-se em conta que a mesma é uma técnica de busca com as seguintes características positivas, que fazem com que devam ser considerados:

- ✓ Paralela: pois mantém uma população de soluções que são avaliadas simultaneamente;
- ✓ Global: AG's não usam apenas informações locais, logo, não necessariamente ficam presos em máximos locais como certos métodos de busca. Esta característica é uma das mais interessantes dos AG's e faz com que eles sejam uma técnica extremamente adequada para funções multimodais e de perfis complexos, como a maioria das funções objetivo associadas a problemas reais;

- ✓ Não totalmente aleatória: existem métodos que usam apenas variáveis aleatórias para realizar a sua pesquisa. AG's tem componentes aleatórios, mas como usam as informações dos dados correntes para determinar o próximo estado da busca, não podem ser considerados completamente aleatórios, reduzindo então o número de soluções a ser avaliado;
- ✓ Não afetada por descontinuidades na função ou em suas derivadas: os AG's não usam informações de derivadas na sua evolução nem necessitam de informação sobre o seu entorno para poder efetuar sua busca. Isso faz com que sejam muito adequados para funções com descontinuidade ou para as quais não temos como calcular suas derivadas;
- ✓ Capaz de lidar com funções discretas e contínuas: os AG's são capazes de lidar com funções reais, discretas, booleanas e até mesmo categóricas (não-numéricas), sendo possível, inclusive, misturar as representações sem prejuízo para a habilidade dos AG's de resolver problemas.

Além disto, tendo em vista que são buscas direcionadas e inteligentes, AG's são boas técnicas para atacar problemas exploratórios com espaços de pesquisa relativamente grandes, que não podem ser resolvidos por técnicas tradicionais, tendo se mostrado adequados para resolver o problema de priorização de obras, pois convivem satisfatoriamente com a natureza discreta do mesmo (Braz, Souza e Alves, 2004).

Detalhes do AG utilizado para a resolução deste problema serão apresentados no Capítulo 5.

4.6. Considerações Finais do Capítulo

O escopo e conteúdo apresentado neste capítulo permitem uma visão geral simplificada a respeito da importância, motivações, dificuldades e formas de resolução do problema de Planejamento da Expansão de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica.

A partir de alguns fatos que ocorrem dentro e fora da empresa, como crescimento da demanda, exigências dos consumidores, questões ambientais, evolução tecnológica, etc., e devido à imensa quantidade de variáveis/restricções envolvidas no problema de planejamento da expansão, como limite de carregamento, queda de tensão, escassez

orçamentária, índices DEC e FEC, foi possível verificar a necessidade da realização de um planejamento detalhado e eficiente por parte das concessionárias.

Neste capítulo foram apresentados alguns métodos para resolução deste problema, como algoritmo de busca em grafos, programação dinâmica, programação linear e programação inteira.

Depois de realizada uma breve explanação a respeito do tratamento a ser dado ao problema de priorização de obras da distribuição, levando em conta a natureza discreta deste problema, foi possível observar, a partir das características positivas descritas na seção anterior, a aplicabilidade dos AG's de forma prática, rápida, eficiente e satisfatória.

Com relação à metodologia aplicada neste trabalho, a ser descrita no próximo capítulo, a mesma terá a capacidade de determinar, dentro de uma listagem de obras, aquelas que são mais atrativas do ponto de vista benefício/custo, atendendo os limites técnicos estabelecidos pelo Órgão Regulador e obedecendo a um nível preestabelecido de orçamento anual. Esta relação benefício/custo foi implementada seguindo a teoria dos Conjuntos de Pareto, descrita no capítulo 3.

CAPÍTULO

5

METODOLOGIA PROPOSTA

Este capítulo tem por objetivo apresentar a metodologia desenvolvida e implementada em software, utilizando os conceitos da Fronteira de Pareto para otimização multiobjetivo, para a determinação de um plano indicativo otimizado de investimentos em redes de Média Tensão (MT), a partir de um plano geral de obras, que leva em conta as características mais significativas/representativas de cada um dos alimentadores em estudo.

5.1 Apresentação da Metodologia de Priorização de Obras

No contexto apresentado no Capítulo 4, foi possível observar que as técnicas atualmente empregadas na execução do planejamento da expansão de sistemas de distribuição, no tocante à priorização de obras, têm uma influência direta nos custos das concessionárias, devendo esta priorização ser realizada da melhor forma possível, sempre levando em conta a relação benefício/custo de cada uma das obras propostas para a mesma.

Neste sentido, este capítulo apresenta o desenvolvimento de uma metodologia para priorização de obras de MT de uma concessionária, visando obter um plano de expansão, dentro do Programa de Construção/Reforma de Alimentadores da mesma.

O objetivo é obter um procedimento para a priorização de investimentos, onde se tem uma relação de obras propostas a serem realizadas, mas devido ao limite orçamentário, deve ser realizada uma hierarquização das mesmas para execução. O critério utilizado para esta seleção é a relação benefício/custo de cada benfeitoria. Os planos de expansão que tiverem uma maior quantidade de obras com boa relação benefício/custo devem ser selecionados e armazenados, para que o planejador possa escolher qual destes melhor atende as necessidades da empresa.

Após a aquisição dos dados de todos os alimentadores envolvidos e das obras que foram propostas para execução dentro do Programa de Construção/Reforma de Alimentadores¹, pode ser feita a solicitação de priorização das obras que entrarão neste programa, de acordo com o orçamento disponível para o mesmo.

A metodologia para priorização de obras desenvolvida neste trabalho é composta, basicamente, de três estágios. São eles:

- 1º estágio: Verificação de dominância da população corrente;
- 2º estágio: Criação de nicho para indivíduos não-dominados;
- 3º estágio: Manutenção de nicho para indivíduos não-dominados.

¹ Esse dados serão apresentados no Capítulo 6. Eles se resumem aos valores de dois parâmetros elétricos por alimentador (carregamento e queda de tensão), um índice de qualidade de energia (FEC) e descrição das obras propostas, com informações de consumidores beneficiados e custos das obras.

De maneira resumida, pode-se definir o primeiro estágio como o responsável pela a verificação de dominância da população corrente, por meio dos objetivos definidos no problema, a partir de um vetor de dominância. Com isso, é possível realizar uma pré-seleção dos planos de expansão que estão sujeitos a serem selecionados e armazenados para a lista final.

Já o segundo estágio utiliza as informações do primeiro estágio para criação de um nicho de indivíduos (que são os planos de expansão criados pelo algoritmo) que, a priori, foram qualificados como não-dominados a partir do primeiro estágio.

O terceiro estágio é responsável pela manutenção do nicho de melhores indivíduos (não-dominados), fazendo uma comparação dos indivíduos que foram qualificados como tal, juntamente com os da população corrente, para certificar realmente que os indivíduos que estão no nicho são aqueles que apresentam as obras de melhor relação benefício/custo.

Assim, com a composição desses três estágios em uma ferramenta computacional, tem-se como saída uma série de planos de expansão, para que o planejador possa realizar um processamento dessas informações e selecionar o plano de expansão que melhor atenda às necessidades da concessionária, do ponto de vista da relação benefício/custo.

Os objetivos utilizados para a resolução do problema, no que diz respeito à verificação da dominância, são:

- queda de tensão percentual do alimentador relacionado;
- custo de cada obra proposta para ingressar no plano de expansão (em R\$);
- carregamento percentual do alimentador que receberá a obra;
- número de consumidores que serão beneficiados pela obra; e
- variação do índice FEC do alimentador relacionado.

O índice FEC foi utilizado no lugar do DEC, devido às obras de rede compacta e multiplexada terem uma influência relevante na redução do FEC, devido a suas características intrínsecas.

Vale salientar que, para fins deste trabalho, objetivos descritos acima não são considerados para cada simulação. Em cada uma delas, foram utilizados 3 (três) dos 5 (cinco) objetivos descritos acima, simultaneamente, com exceção da quinta simulação, realizada na seção 6.5 – Estudo de caso III, onde foram utilizados 4 (quatro). As

simulações poderiam ter sido realizadas com todos os critérios simultaneamente, sem causar alterações substanciais no tempo de processamento do algoritmo, mas por questões de simplicidade, optou-se realizar-las como descrito anteriormente.

A seguir, serão apresentados os estágios citados acima, descrevendo as atribuições de cada um destes.



Figura 5.1 – Fluxograma da metodologia para priorização de obras

5.2 1º Estágio – Verificação de Dominância da População Corrente

No primeiro estágio da metodologia proposta, procura-se qualificar o número de indivíduos da população corrente em dominado ou não-dominado, para que sejam selecionados para inclusão no nicho apenas os melhores indivíduos (não-dominados).

Conforme já citado no capítulo que trata sobre algoritmos genéticos (Capítulo 3), a idéia de dominância vem a partir da **Teoria do Conjunto de Pareto**. Várias soluções de um determinado problema são consideradas viáveis quando não existe nenhuma outra solução (ou soluções) melhor do que elas no espaço de busca, quando todos os objetivos são considerados simultaneamente. Estas soluções são conhecidas por soluções ótimas de Pareto. O conjunto destas soluções é denominado conjunto de Pareto. As soluções que estão inseridas neste conjunto são chamadas de soluções **não-dominadas**, caso contrário, são denominadas soluções **dominadas**.

Inicialmente, todos os indivíduos da população corrente recebem o valor 0 (zero), qualificando-os, a priori, como não-dominados. Para que esta qualificação seja operacionalizada, um vetor dominância é inicializado, onde cada linha deste vetor faz referência a um indivíduo da população corrente (o número da linha do vetor dominância é igual ao número da linha da matriz populacional).

O próximo passo é a comparação entre os indivíduos da população. Seguindo a teoria do conjunto de Pareto, quando uma solução B é dominada por outra solução A em cada uma de suas coordenadas de avaliação (objetivos), a solução B recebe o valor 1 (um) no vetor de dominância, significando que o mesmo foi dominado.

Este procedimento pode ser verificado no fluxograma da Figura 5.2.

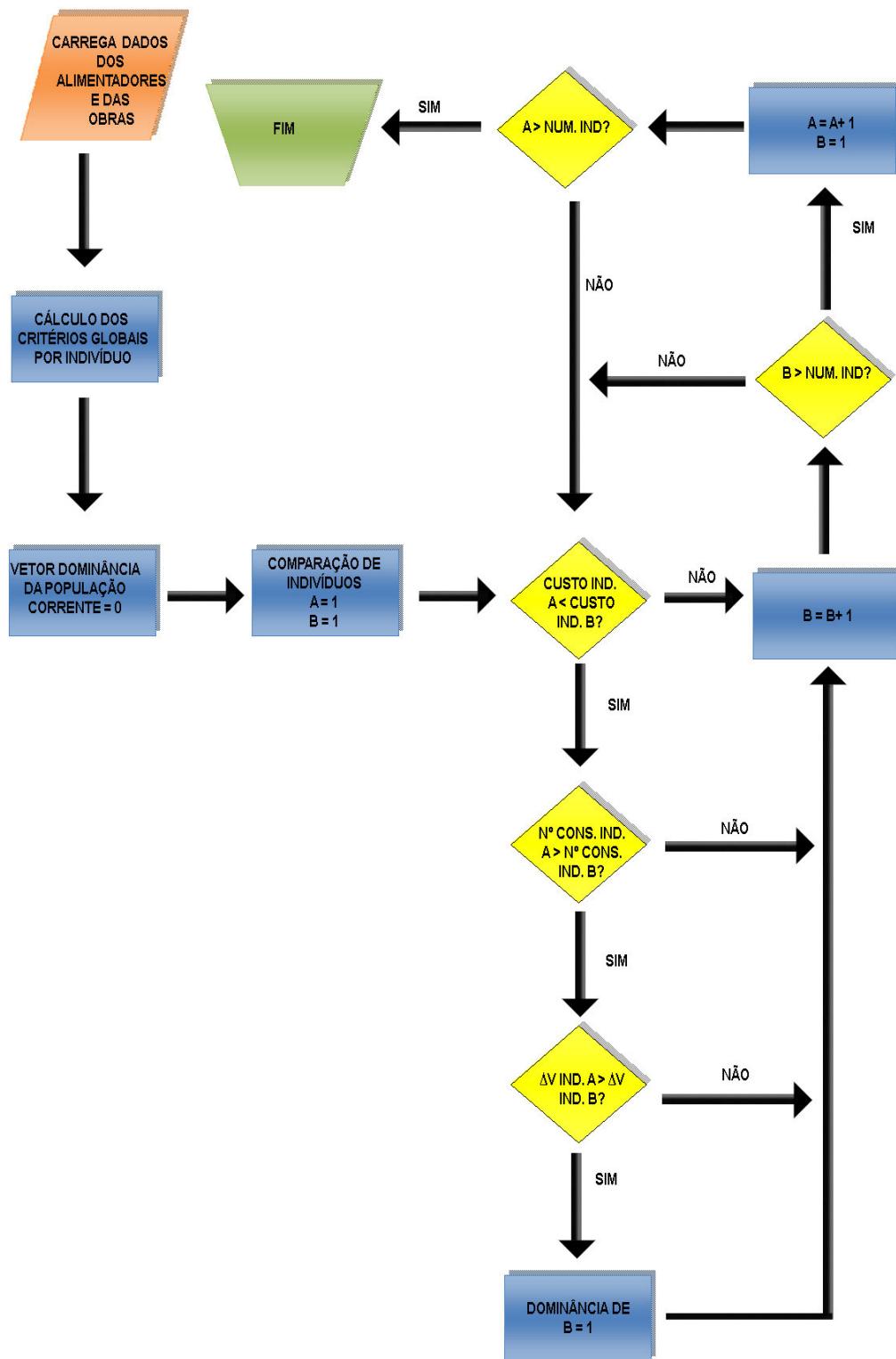


Figura 5.2 – Fluxograma do algoritmo para verificação da dominância da população corrente

Tabela 5.1 – Legenda do fluxograma apresentado na Figura 5.2

Carrega dados dos alimentadores e das obras	Obtém informações dos objetivos definidos em cada simulação, referente a cada obra proposta, a participar do processo de priorização.
Cálculo dos objetivos globais por indivíduo	Cálculo dos objetivos globais de cada indivíduo (plano de expansão), a partir da soma dos objetivos individuais das obras pertencentes ao plano de expansão em questão.
Vetor dominância da população corrente = 0	Inicialização do vetor de dominância, onde, a priori, todos os indivíduos da população corrente são não-dominados, isto é, dominância igual a zero.
Comparação de indivíduos - A = 1 e B = 1	Início da comparação entre indivíduos da população corrente. O indivíduo A é o de referência.
Custo Ind A < Custo Ind B ?	O custo do indivíduo A é menor que o do B ?
Nº cons. Ind A > Nº cons. Ind B ?	O nº de consumidores beneficiados pelo indivíduo A é maior que o do B ?
ΔV Ind A > ΔV Ind B ?	A queda de tensão no indivíduo A é maior que no B? ²
Dominância de B = 1	Define o indivíduo B como dominado pelo A.
B = B + 1	Início de uma nova comparação do indivíduo A com outro da população corrente.
B > num. Ind ?	O contador B ultrapassou a quantidade total de indivíduos da população corrente?
A = A + 1 e B = 1	Início de uma nova comparação. Alterado do indivíduo de referência (A) e inicializado o indivíduo B.
A > num. Ind ?	O contador A ultrapassou a quantidade total de indivíduos da população corrente?
FIM	Final do estágio.

5.3 2º Estágio – Criação de Nicho para Indivíduos Não-Dominados

No segundo estágio, os indivíduos que foram qualificados como não-dominados³ são armazenados em um “nicho”, juntamente com os valores de seus atributos (objetivos), para que possam ser comparados com indivíduos das populações que serão geradas ao longo do processamento da rotina.

Caso o nicho já tenha sido criado, os indivíduos não-dominados da população corrente são comparados com os que estão inseridos no nicho. Aqueles indivíduos da população corrente que forem dominados pelos que estão no nicho, a partir da comparação de seus atributos (objetivos), são retirados da lista de indivíduos não-dominados da população corrente, recebendo o valor 1 (um) no vetor dominância, sendo, então, qualificado como dominado.

² Este ΔV está relacionado com a queda de tensão do alimentador antes e depois da obra. Então, o alimentador que tiver uma maior queda de tensão antes de receber a obra tem prioridade em receber o investimento.

³ A verificação da dominância de cada indivíduo é realizada a partir do “vetor dominância” criado no primeiro estágio da metodologia (descrito na seção passada).

No fluxograma da figura 5.3 é apresentado o procedimento descrito acima.

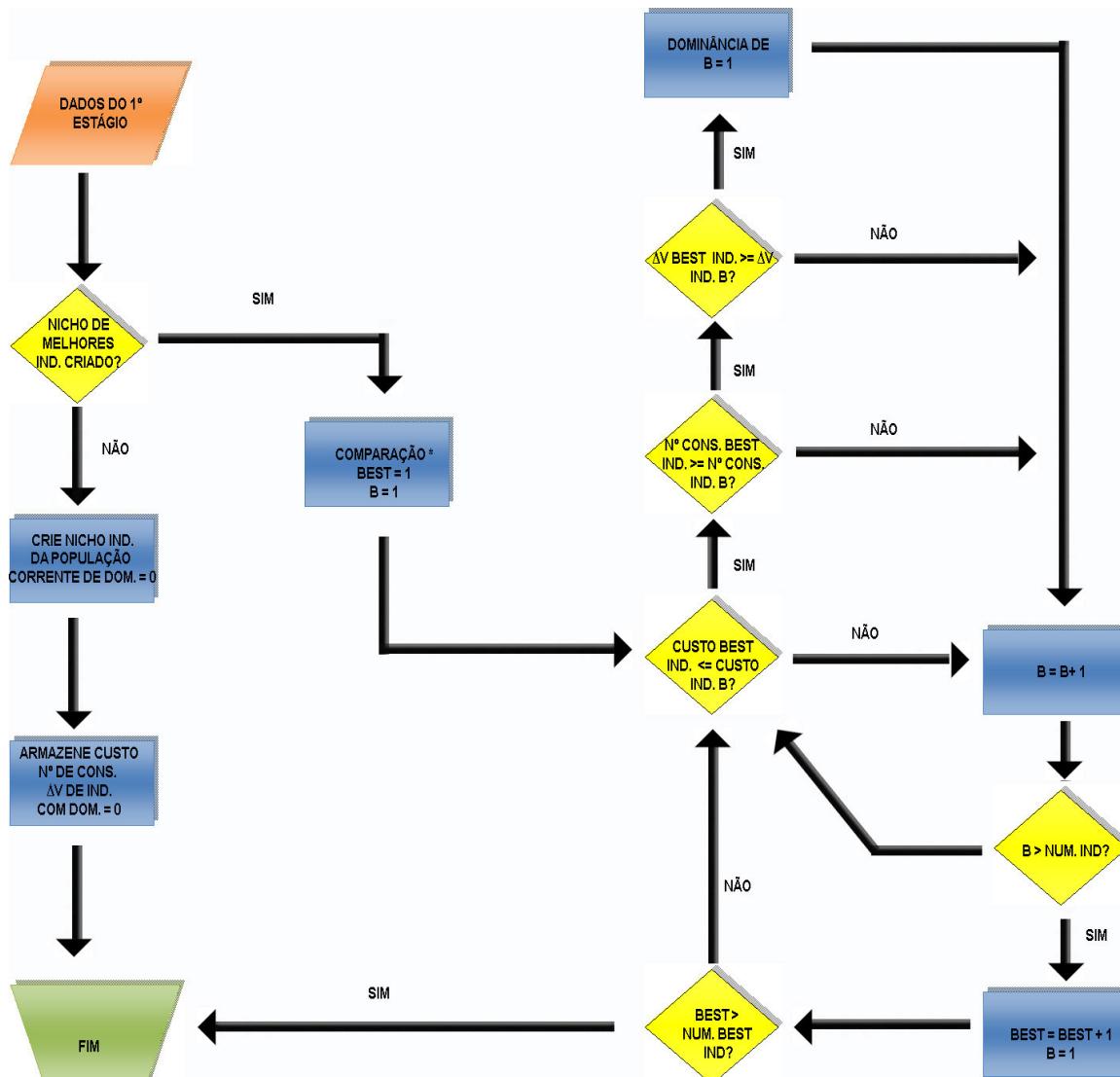


Figura 5.3 – Fluxograma do algoritmo para criação de nicho para indivíduos não-dominados

Tabela 5.2 – Legenda do fluxograma apresentado na figura 5.3

Dados do 1º estágio	Recebe as informações do 1º estágio, referente à dominância dos indivíduos (planos de expansão) da população corrente
Nício de melhores ind. criado?	Verifica que o nício para armazenamento dos melhores indivíduos (não-dominados) já foi criado.
Crie nício ind. da população corrente de dom = 0	Cria nício com todos os indivíduos não-dominados da população corrente, isto é, com dominância igual a zero. (melhores indivíduos).

Armazene custo, nº cons., ΔV de ind. com dom. = 0	Armazena as informações de custo, nº de consumidores beneficiados e queda de tensão de cada indivíduo que pertence ao nicho de indivíduos não-dominado.
Comparação* BEST = 1 e B = 1	Comparação de indivíduos da população corrente com os pertencentes ao nicho (não-dominados). BEST: contador de indivíduos não-dominados, pertencentes ao nicho (indivíduo de referência). B: Contador dos indivíduos da população corrente.
Custo BEST ind <= Custo ind B ?	O custo do indivíduo BEST é menor ou igual ao do B ?
Nº cons. BEST ind >= Nº cons. Ind B ?	O nº de consumidores beneficiados pelo indivíduo BEST é maior ou igual ao do B ?
ΔV BEST ind >= ΔV ind B ?	A queda de tensão do indivíduo BEST é maior ou igual ao do B ?
Dominância de B = 1	Define o indivíduo B como dominado pelo BEST.
B = B + 1	Início de uma nova comparação do indivíduo BEST com outro da população corrente.
B > num. ind ?	O contador B ultrapassou a quantidade total de indivíduos da população corrente?
BEST = BEST + 1 e B = 1	Início de uma nova comparação. Alterado do indivíduo de referência (BEST) e inicializado o indivíduo B.
BEST > num. BEST ind ?	O contador BEST ultrapassou a quantidade total de indivíduos do nicho?
FIM	Final do estágio.

5.4 3º Estágio – Manutenção de Nicho para Indivíduos Não-Dominados

Com as informações processadas no estágio anterior, o terceiro estágio fica encarregado de realizar a manutenção do nicho criado para os melhores indivíduos. Isso significa dizer que, caso algum indivíduo que esteja inserido no nicho, qualificado como não-dominado, seja dominado por um indivíduo da população corrente, este é substituído pelo pertencente ao nicho⁴.

Neste estágio, uma variável auxiliar é inicializada para identificar se houve ou não a substituição descrita acima. Cada vez que este estágio é executado, esta variável recebe o valor 0 (zero). Caso a substituição seja efetivada, a mesma recebe valor 1 (um). Caso a substituição não seja realizada, isso significa que este indivíduo que está inserido no nicho, e que foi comparado com outro não-dominado da população corrente, é realmente não-dominado, ficando então a variável auxiliar com o valor 0 (zero). Isto se verificando, o indivíduo não-dominado da população, juntamente com seus atributos (objetivos), são armazenados no nicho.

⁴ Este procedimento é novamente realizado a partir da comparação dos atributos (objetivos) dos indivíduos qualificados como melhores com os que pertencem a população corrente.

Na figura 5.4 é mostrado o fluxograma demonstrando os procedimentos deste estágio.

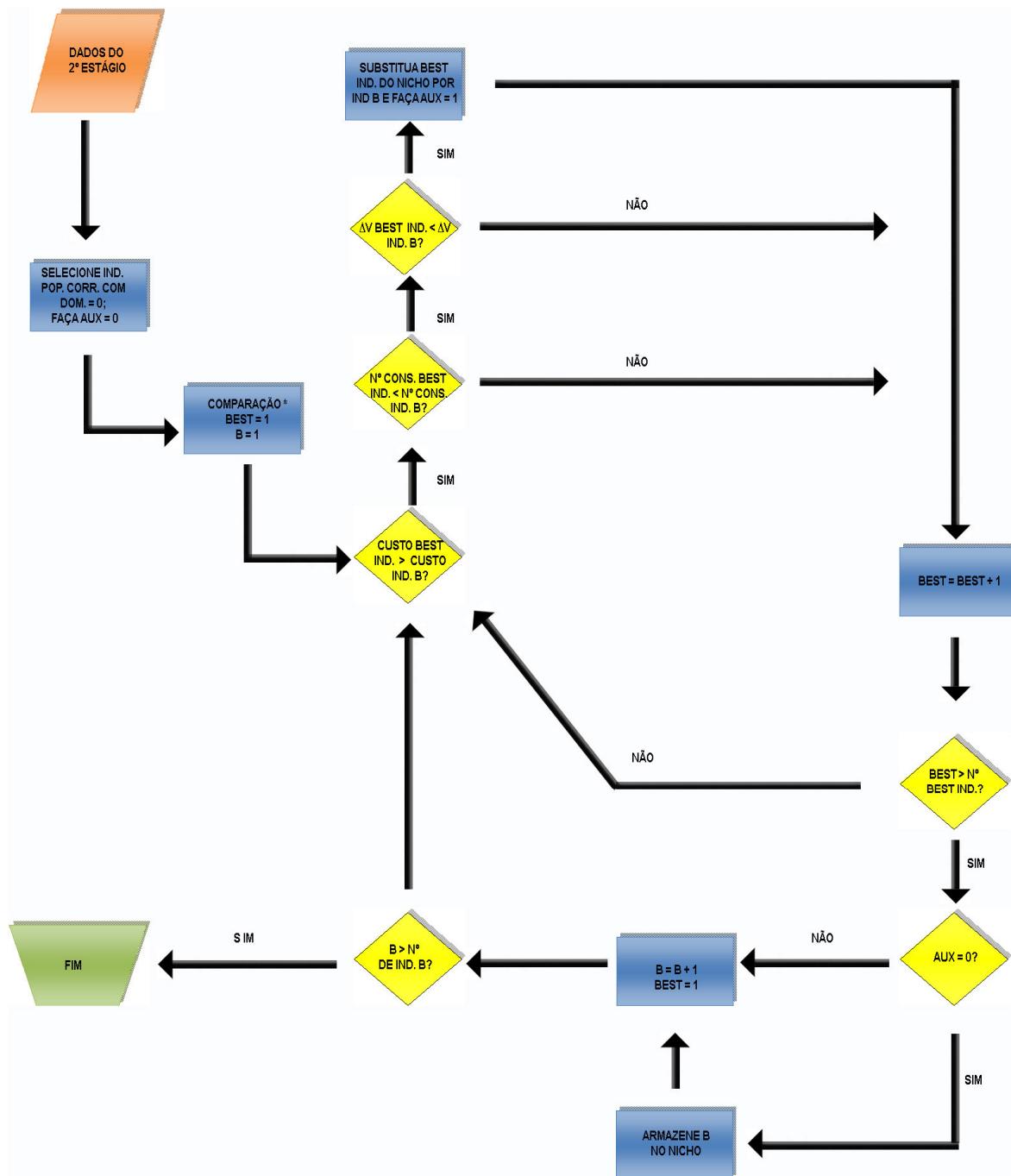


Figura 5.4 – Fluxograma do algoritmo para manutenção de nicho para indivíduos não-dominados

Tabela 5.3 – Legenda do fluxograma apresentado na figura 5.4

Dados do 2º estágio	Recebe as informações do 2º estágio, referente ao nicho de melhores indivíduos (não-dominados) e os da população corrente.
Selecione ind. pop. corr. com dom. = 0; aux = 0	Selecione os indivíduos da população corrente com dominância igual a zero (não-dominados) e faça a variável auxiliar chamada "aux" igual a zero.
Comparação* BEST = 1 e B = 1	Comparação de indivíduos da população corrente e que possuem dominância igual a zero com os pertencentes ao nicho (não-dominados). BEST: contador de indivíduos não-dominados, pertencentes ao nicho. B: Contador dos indivíduos da população corrente e de dominância igual a zero (indivíduo de referência).
Custo BEST ind > Custo ind B ?	O custo do indivíduo BEST é maior do que o do B ?
Nº cons. BEST ind < Nº cons. ind B ?	O nº de consumidores beneficiados pelo indivíduo BEST é menor do que o do B ?
ΔV BEST ind < ΔV ind B ?	A queda de tensão do indivíduo BEST é menor do que o do B ?
Substitua BEST ind. do nicho por ind. B e faça aux = 1	Substitui o indivíduo do nicho pelo da população corrente e com dominância igual a zero, juntamente com seus atributos de custo, nº de consumidores beneficiados e queda de tensão. Faz contador auxiliar igual a um.
BEST = BEST + 1	Início de uma nova comparação do indivíduo B (não-dominado) com outro do nicho de melhores indivíduos.
BEST > Nº BEST ind ?	O contador BEST ultrapassou a quantidade total de indivíduos do nicho?
aux = 0 ?	Verifica se a variável "aux" é realmente zero (se o indivíduo da população corrente ainda não foi armazenado no nicho)
Armazene B no nicho	Armazena o indivíduo B no nicho, juntamente com seus atributos de custo, nº de consumidores beneficiados e queda de tensão.
B = B + 1 e BEST = 1	Início de uma nova comparação. Alterado do indivíduo de referência (B) e inicializado o indivíduo BEST.
B > num. ind B ?	O contador B ultrapassou a quantidade total de indivíduos da população corrente com dominância igual a zero?
FIM	Final do estágio.

Quando o terceiro estágio é concluído, é realizada uma verificação no nicho para identificar possíveis indivíduos iguais. Caso isto seja constatado, os indivíduos em duplicata são descartados.

5.5 Detalhes do AG Desenvolvido

Esta seção foi desenvolvida com o objetivo de realizar uma descrição sucinta do algoritmo genético utilizado, no que diz respeito a seus parâmetros principais.

5.5.1 Inicialização do AG

Inicialmente alguns indivíduos são gerados aleatoriamente para formar a primeira geração do algoritmo. O tamanho desta população varia de acordo com o tipo de problema em estudo (Ashlock, 2005).

Com relação ao tamanho da população, para fins deste trabalho, a população inicial utilizada foi de 20 (vinte) indivíduos, sendo constante durante todo o processo. Segundo a literatura, sugere-se que o tamanho da população fique entre 20 (vinte) e 100 (cem) indivíduos (Castro, 2001).

5.5.2 Valores Globais por Objetivo

Para que fosse possível avaliar cada um dos indivíduos (planos de expansão) que são gerados durante o desenvolvimento do algoritmo, foi preciso realizar o cálculo dos objetivos globais de cada um destes. O cômputo desta avaliação é feito a partir da soma de cada um dos objetivos individuais, referente a cada obra que irá participar do processo de otimização, para cada plano de expansão a ser avaliado.

Como citado anteriormente, os objetivos que fazem parte do problema são: custo de cada obra proposta para ingressar no plano de expansão (em R\$), número de consumidores que serão beneficiados, queda de tensão e carregamento percentuais, e variação de FEC nos respectivos alimentadores que vão receber as benfeitorias.

5.5.3 Cromossomo e Apresentação dos Resultados

O cromossomo representado neste trabalho faz referência a um possível plano de expansão a ser escolhido pelo planejador, onde cada gene representa a efetivação da execução de uma determinada obra a ser avaliada (forma binária).

A partir da avaliação multiobjetivo, que é realizada durante todo o processo de execução do algoritmo, este é encarregado de criar um nicho com os melhores planos de expansão, a partir de uma abordagem baseada em conjuntos de Pareto. A figura 5.5 representa o formato da cada cromossomo (indivíduo), que faz referência aos planos propostos pela rotina computacional, segundo o que foi descrito acima, assim como a forma de apresentação dos resultados obtidos.

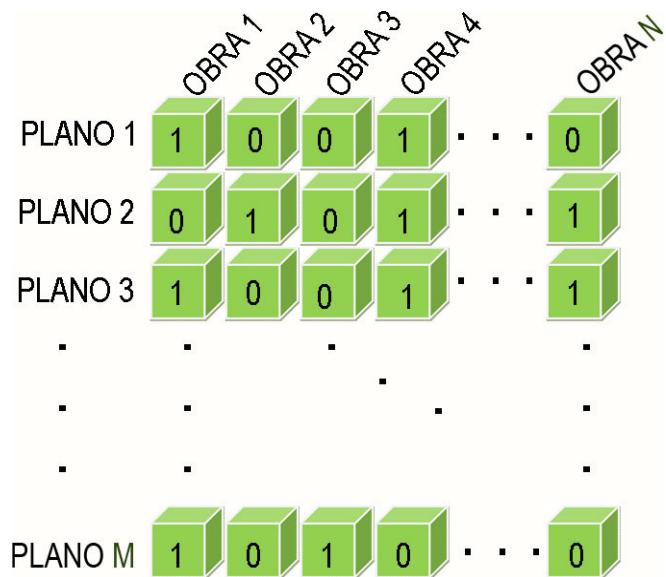


Figura 5.5 – Representação cromossômica e apresentação dos resultados

5.5.4 Seleção, *Crossover* e Mutação

O tipo de seleção utilizado foi o torneio com 2 (dois) indivíduos, pois o mesmo apresentou um bom desempenho do algoritmo no que diz respeito aos resultados apresentados e ao tempo de processamento.

Uma melhor explanação a respeito desta técnica de seleção é descrita no capítulo 3, seção 3.5.2.2 – Torneio.

O operador *crossover* utilizado é o uniforme, pois, segundo a literatura, este possui uma tendência de produzir melhores soluções (Linden, 2006).

A forma de atuação deste tipo de cruzamento está descrito no Capítulo 3, seção 3.5.3.3 – *Crossover Uniforme*.

Após a execução das operações de cruzamento entre os pares de genitores, tem-se uma nova população temporária. São 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 da mesma.

Esse operador de mutação é aplicado aos indivíduos de acordo com o percentual de mutação (probabilidade). Para este trabalho, o valor aplicado para este operador foi 5%, pois apresentou uma boa diversidade das populações geradas.

5.5.5 Critério de parada

Os AG's usam modelos computacionais dos processos naturais de evolução como uma ferramenta para resolver problemas, onde estes buscam melhorar a aptidão dos resultados a cada geração, até que algum critério de parada seja verificado.

O critério utilizado para término do processo evolutivo, para fins deste trabalho, foi o número de gerações, num valor de 150 (cento e cinqüenta).

5.5.6 Função de Avaliação (*Fitness*) e Armazenamento de Resultados

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

Inicialmente, os indivíduos da população corrente são comparados entre si, onde os melhores, de acordo com os objetivos estabelecidos e seguindo uma analogia baseada no NPGA (descrito no Capítulo 3), são aglomerados em um “nicho”.

A partir da segunda geração, os indivíduos da população corrente são comparados entre si e com os pertencentes ao nicho. Aqueles que são considerados não-dominados, sendo considerado um **ótimo de Pareto**, teoria estabelecida por Vilfredo Pareto (descrito no Capítulo 3, seção 3.6), são armazenados neste nicho, juntamente com os seus objetivos globais, para que estas informações possam ser avaliadas pelo decisor, com o intuito que este escolha qual destes resultados é mais interessante para o mesmo.

5.6 Considerações Finais do Capítulo

Este capítulo teve o objetivo de apresentar a metodologia proposta para resolução do problema de determinação de um plano indicativo otimizado de investimentos em redes de MT, a partir de um plano geral de obras, levando em conta algumas características dos alimentadores que são estudados. O software implementado utiliza uma abordagem baseada em Conjuntos de Pareto para otimização multiobjetivo.

No final deste capítulo, foi realizada uma breve explanação a respeito dos detalhes do AG desenvolvido, apresentando população inicial, valores globais por objetivo, formato do cromossomo e da apresentação dos resultados, os operadores de seleção, *crossover* e

mutação aplicados, critério de parada do algoritmo, função de avaliação e forma de armazenamento dos resultados.

No capítulo seguinte serão descritos os passos que foram tomados no que diz respeito à simulação realizada, para que seja possível efetuar a validação dos resultados apresentados.

CAPÍTULO

6

SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Este capítulo apresenta a aplicação da proposta de priorização de obras em sistemas de distribuição utilizando uma abordagem baseada nos algoritmos genéticos de Pareto, por meio de simulações que emulam o processo de escolha de obras a serem executadas, segundo uma lista de obras candidatas de uma determinada concessionária de energia elétrica.

6.1 Descrição das Etapas de Simulação

O propósito deste capítulo é apresentar alguns estudos de casos que possibilitem a validação da metodologia desenvolvida para definição de uma lista de planos de expansão, relacionando as obras priorizadas, para serem executadas em um determinado período, de acordo com uma quantidade de recurso disponível a ser investido no Programa de Construção/Reforma de Alimentadores de uma determinada concessionária.

Para tanto, é necessário que o planejador defina um intervalo de investimentos previstos, para que, após a simulação, sejam selecionados apenas os planos de expansão que estejam inseridos nesta faixa de valores.

Após uma análise por parte do planejador, o mesmo define o plano de expansão com as obras priorizadas que for mais conveniente para a empresa. Vale salientar que as obras são priorizadas de acordo com os objetivos definidos pelo planejador, dentro da ferramenta computacional.

Esta ferramenta tem a função de apoiar a decisão a ser tomada pelo planejador, e não defini-la, já que a mesma disponibilizará para a escolha do planejador alguns planos de expansão, de acordo com a faixa de valores previstos a serem investidos pela concessionária.

6.2 Dados das obras e sistema de distribuição utilizados nos estudos

Os dados utilizados nas simulações foram retirados do banco de dados de uma concessionária real, tanto os dados dos alimentadores existentes quanto das obras de alimentadores propostas para um determinado período de investimento. Os dados utilizados como objetivos e retirados deste banco da concessionária foram:

- custo de cada obra proposta para ingressar no plano de expansão, em R\$ (para todos os estudos de caso);
- número de consumidores que cada obra vai beneficiar (estudos de Caso I e II); e
- queda de tensão nos respectivos alimentadores que vão receber as obras (todos os estudos de Caso);
- carregamento percentual nos alimentadores que receberão as benfeitorias (estudo de caso III);

- variação do índice FEC dos alimentadores - FEC depois de receber a obra subtraído do FEC antes da mesma (estudo de caso III, segunda simulação).

Para cada estudo de Caso, foram utilizadas listagem de obras propostas a serem executadas em regiões distintas da área de concessão da distribuidora.

6.3 Estudo de Caso I

Os objetivos considerados são: custo da obra (em R\$), nº de consumidores a serem beneficiados pela respectiva obra e queda de tensão relacionada ao alimentador que receberá a obra.

Seguem abaixo na tabela 5.1 as obras propostas a serem executadas:

Tabela 6.1 – Relação de obras propostas para o caso I

Nº OBRA	ALIMENTADOR	Nº CONS. BENEF.	CUSTO (R\$)	ΔV (%)	DESCRÍÇÃO	JUSTIFICATIVA
1	SBB-06	860	26.227,56	7,3	Regulação de tensão e capacidade do cabo	Melhor regulação de tensão e liberação de carga para o alimentador
2	SBB-06	860	40.951,62	7,3	Regulação de tensão e capacidade do cabo	Melhor regulação de tensão e liberação de carga para o alimentador
3	RNO-01 e RNO-04	3728	12.956,93	6,2	Construção de anel entre alimentadores	Possibilidade de transferência de carga em caso de contingência
4	RNO-01	124	39.070,52	6,2	Regulação de tensão e capacidade do cabo	Melhor regulação de tensão e liberação de carga para o alimentador
5	RNO-04	1253	25.625,58	3,9	Trocar condutor da AT em péssimo estado e melhorar capacidade de condução do cabo	Melhor regulação de tensão e liberação de carga para o alimentador e garantia de segurança
6	SBS-01 e SBS-04	530	52.366,72	0,2	Construção de anel entre alimentadores	Possibilidade de transferência de carga em caso de contingência
7	SBB-03 e SBB-05	1343	18.567,28	4,8	Construção de anel entre alimentadores	Possibilidade de transferência de carga em caso de contingência
8	SBS-09	1835	35.460,65	2,7	Regulação de tensão e capacidade do cabo	Melhor regulação de tensão e liberação de carga para o alimentador
9	SBS-09	795	45.124,44	2,7	Pedido de aumento de carga de consumidor Grupo A	Melhor regulação de tensão, liberação de carga para o alimentador e para o consumidor
10	SBS-09	1835	33.294,85	2,7	Regulação de tensão e capacidade do cabo	Melhor regulação de tensão e liberação de carga para o alimentador

11	SBS-02 e SBS-03	2803	44.390,29	4,4	Construção de anel entre alimentadores para transferência de carga em carga pesada	Possibilidade de transferência de carga em caso de contingência em carga pesada
12	SBS-09	1835	25.513,61	2,7	Regulação de tensão e capacidade do cabo	Melhor regulação de tensão e liberação de carga para o alimentador
13	SBS-09	1835	25.773,12	2,7	Regulação de tensão e capacidade do cabo	Melhor regulação de tensão e liberação de carga para o alimentador

Custo Total	425.223,17
-------------	------------

As obras que possuem descrições iguais mas custos diferentes são benfeitorias que serão realizadas no mesmo alimentador, mas em trechos distintos.

O planejador pretende realizar um investimento entre R\$ 210.000,00 e R\$ 220.000,00 no Programa de Construção/Reforma de Alimentadores.

De acordo com os objetivos estabelecidos (custo da obra em R\$, nº de consumidores beneficiados e queda de tensão percentual), a rotina computacional selecionará aqueles planos de expansão que terão uma melhor relação benefício/custo, isto quer dizer, com obras que tenham o menor custo, beneficie a maior quantidade de consumidores e que tenham uma maior queda de tensão no alimentador (ou alimentadores) relacionado.

Seguindo esta idéia, os seguintes planos de expansão são propostos:

Tabela 6.2 – Relação de planos de expansão selecionados para o Caso I

Plano/Obra	Obra 1	Obra 2	Obra 3	Obra 4	Obra 5	Obra 6	Obra 7	Obra 8	Obra 9	Obra 10	Obra 11	Obra 12	Obra 13	Custo do Plano de Expansão
Plano 168	1	1	1	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	213.832,00
Plano 236	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	214.838,00
Plano 142	1	0	1	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1	216.819,00
Plano 201	1	1	1	0	1	0	1	1	0	1	0	1	0	218.700,00

Para esta simulação, a rotina computacional gerou 250 planos de expansão, porém, os planos que apresentaram valores de investimento entre R\$ 210.000,00 e R\$ 220.000,00 foram apresentados na tabela acima. O tempo de simulação foi de 4 segundos e 12 centésimos. As quedas de tensões nos alimentadores relacionados podem ser vistos no Apêndice A.

Fazendo uma análise da planilha acima, pode-se verificar que as obras 1, 3 e 12 estão em todos os planos de expansão apresentados na tabela 6.2. Isso ocorre porque o objetivo **custo** avaliado para estas obras são relativamente baixos, e os objetivos **consumidores beneficiados e queda de tensão no alimentador** são relativamente altos, sendo estas obras fortes candidatas a serem executadas.

Fazendo uma avaliação mais detalhada da obra nº 3, de acordo com a relação benefício/custo, dentre as obras apresentadas na tabela 6.1, esta é a melhor (maior relação), pois a mesma custa R\$ 12.956,93 (obra com menor custo), beneficia a maior quantidade de consumidores (3728 unidades) e o alimentador relacionado a ela possui uma queda de tensão alta (6,2% abaixo do valor nominal, o segundo maior valor dentre as obras listadas). Devido a isto, a obra nº 3 é selecionada para ser executada em todos os planos de expansão propostos.

Fazendo agora uma avaliação da obra nº 6, a qual não foi selecionada em nenhum dos planos de expansão apresentados na tabela 6.2, verifica-se que a mesma tem um custo previsto de R\$ 52.366,52 (obra com o maior custo), beneficia a segunda menor quantidade de consumidores (530 unidades), e possui a mais baixa queda de tensão (0,2% abaixo do valor nominal).

Pelas informações descritas no parágrafo acima, é possível concluir que a obra nº 6 realmente deve ficar fora dos planos de expansão, pelo fato de ser uma obra com uma relação benefício/custo não atrativa para a concessionária.

6.4 Estudo de Caso II

Para realizar uma melhor avaliação a respeito da priorização por parte da rotina computacional, resolveu-se realizar duas simulações com uma lista de obras propostas com apenas 5 obras. Os objetivos considerados são os mesmos do estudo de Caso I.

As obras propostas podem ser vistas na tabela 5.3.

Tabela 6.3 – Relação de obras propostas para o Caso II

Nº OBRA	ALIMENTADOR	Nº CONS. BENEF.	CUSTO (R\$)	ΔV (%)	DESCRÍÇÃO	JUSTIFICATIVA
1	COA-01	11.117	423.821,84	6,4	Recondutoramento de parte do tronco do AL COA 01	Violação dos níveis de tensão exigidos pela Resolução 505 da ANEEL. Troca de cabo até o trevo de Itá e deslocamento do regulador existente para adiante deste ponto.

2	COA-05	4078	598.454,77	6,1	Troca de cabo para diminuir queda de tensão e novo traçado para facilitar acesso	Esta obra contribuiu significativamente para retirar o referido AL das condições de nível de tensão com violação, além de diminuir o tempo de atendimento.
3	COA-05	2039	809.245,93	6,1	Reisolamento do AL COA-05 (classe 15kV p/ 25kV) (Etapa 1)	Esta obra faz parte do programa de reisolamento do AL COA-05 (15kV) para tensão de 25kV, permitindo futura alimentação pela SE COA-2 e interligação entre CDS-01 (SE Catanduvas) e COA-05 (SE Concórdia 2). Parte da carga do COA-05 transferida para o CDS-01 aliviou a queda de tensão do COA-05.
4	COA-05	10195	68.112,70	6,1	Reisolamento do AL COA-05 (classe 15kV p/ 25kV) (Etapa 2)	Esta obra faz parte do programa de reisolamento do AL COA-05 (15kV) para tensão de 25kV, permitindo futura alimentação pela SE COA-2 e interligação entre CDS-01 (SE Catanduvas) e COA-05 (SE Concórdia 2). Parte da carga do COA-05 transferida para o CDS-01 aliviou a queda de tensão do COA-05.
5	IRM-04 (extensão)	2755	512.140,06	-0,9	Atendimento a demanda futura com qualidade e confiabilidade.	Atendimento a Frigorífico, com demanda contratada de 530kW e consumo mensal de 250MWh, além da melhoria no nível de tensão e alívio de carga na SE Arabutã.

Custo Total	2.411.775,30
-------------	--------------

O valor negativo de queda de tensão percentual significa alimentador com nível tensão acima do valor nominal. O resultado dado pela rotina pode ser verificado na tabela 5.4.

Tabela 6.4 – Relação de planos de expansão gerado para o Caso II, simulação 1

Plano\Obra	Obra 1	Obra 2	Obra 3	Obra 4	Obra 5	Custo do Plano de Expansão
Plano 1	0	0	0	1	0	68.112,70
Plano 2	1	0	0	0	0	423.821,84
Plano 3	1	0	0	1	0	491.934,54
Plano 4	1	0	0	1	1	1.004.074,60
Plano 5	1	0	1	1	0	1.301.180,47
Plano 6	1	0	1	1	1	1.813.320,53
Plano 7	1	1	0	0	0	1.022.276,61
Plano 8	1	1	0	1	0	1.090.389,31
Plano 9	1	1	0	1	1	1.602.529,37
Plano 10	1	1	1	0	0	1.831.522,54
Plano 11	1	1	1	1	0	1.899.635,24
Plano 12	1	1	1	1	1	2.411.775,30

Todos os planos gerados na simulação foram apresentados na tabela 6.4. O tempo de simulação foi de 2 segundos e 97 centésimos.

Avaliando a tabela acima, verifica-se que, caso apenas uma obra tivesse que ser escolhida pelo planejador para ser executada por parte da concessionária, seriam propostas a obra 4 (plano 1) ou obra 1 (plano 2).

Avaliando a relação benefício/custo, a obra 4 foi selecionada como prioritária devido a ser a menos onerosa quando comparada com as restantes, beneficia uma quantidade considerável de consumidores (a segunda da lista, ficando atrás apenas da obra 1) e o alimentador relacionado à mesma (que receberá a obra) possui uma queda de tensão percentual relativamente alta (6,1%, a segunda maior da lista).

Fazendo uma avaliação semelhante no que diz respeito aos dados da obra 1, verifica-se que a mesma também possui uma boa relação benefício/custo, pois sendo a segunda obra menos onerosa, a mesma beneficia a maior quantidade de consumidores e o alimentador relacionado a esta possui a maior queda de tensão percentual dentre as obras listadas na tabela 5.3.

Segue na tabela 6.5 o resultado obtido pelos especialistas da concessionária.

Tabela 6.5 – Resultados apresentados pelos especialistas da concessionária para o Caso II, simulação 1

Obra	Alimentador	N de cons. benef.	Descrição	Custo (R\$)	Justificativa
1	COA-01	11.117	Recondutoramento de parte do tronco do AL COA 01 (trecho entre CD 984 e regulador de tensão 311 - trevo de Itá). Proj. 2601337	423.821,84	Violação dos níveis de tensão exigidos pela Resolução 505 da ANEEL. Troca de cabo até o trevo de Itá e deslocamento do regulador existente para adiante deste ponto.
4	COA-05	10.195	Reisolamento do AL COA-05, com troca de isoladores, chaves, transformadores e pára-raios, possibilitando atendimento pelo AL CDS-01 (trecho da FR 621 +- 45 TD's). 3ª ETAPA.	68.112,70	Possibilita interligar COA-05 com CDS-01 a partir da nova SE COA II em 25kV.

Custo Total	491.934,54
--------------------	-------------------

Então, observando a tabela 6.4, que apresenta os planos de expansão propostos pela rotina computacional, pode-se observar que o plano escolhido pelos especialistas foi o 3, contemplando as obras nº 1 e 4, dada a consideração de uma restrição orçamentária de R\$

500.000,00. Se esta restrição orçamentária fosse utilizada no processo de simulação, a rotina computacional apresentaria como resposta apenas os planos de 1 a 3.

Com o intuito de realizar uma nova avaliação da tomada de decisão tomada pela rotina computacional, caso sejam alterados os dados de nº de consumidores beneficiados e queda de tensão percentual no alimentador referente à obra 3, para os valores de 10 (dez) consumidores e -1,5% respectivamente, isso faz com que esta obra, dentre as obras listadas, seja a com a menor relação benefício/custo, pois é a obra mais onerosa, e a mesma é proposta a ser realizada em um alimentador que beneficia pouquíssimos consumidores e não tem problemas no requisito “queda de tensão”.

Ao realizar uma simulação com estes parâmetros alterados, obteve-se o resultado apresentado na tabela 5.5.

Tabela 6.6 – Relação de planos de expansão gerado para o caso II, simulação 2

Plano\Obra	Obra 1	Obra 2	Obra 3	Obra 4	Obra 5	Custo do Plano de Expansão
Plano 1	0	0	0	1	0	68.112,70
Plano 2	0	1	0	0	0	598.454,77
Plano 3	0	1	0	1	0	666.567,47
Plano 4	1	0	0	0	0	423.821,84
Plano 5	1	0	0	1	0	491.934,54
Plano 6	1	0	0	1	1	1.004.074,60
Plano 7	1	1	0	0	0	1.022.276,61
Plano 8	1	1	0	1	0	1.090.389,31
Plano 9	1	1	0	1	1	1.602.529,37
Plano 10	1	1	1	1	1	2.411.775,30

Analizando a tabela acima, pode-se verificar que, pelo exposto anteriormente, a obra 3 ficou ausente de praticamente todos os planos de expansão apresentados pela rotina, aparecendo apenas naquele plano em que todas as obras foram selecionadas. O tempo de processamento da rotina computacional foi de 2 segundo e 78 centésimos.

6.5 Estudo de Caso III

Este estudo de caso tem a finalidade de avaliar a importância da utilização dos objetivos adequados no momento da avaliação do plano de obras. Isso se faz necessário devido a alguns tipos de redes, utilizadas atualmente nos sistemas de distribuição, possuírem características diferenciadas quando comparadas com as redes aéreas convencionais. São elas: **Rede Protegida ou Compacta e Rede Isolada ou Multiplexada**.

Levando em conta as colocações realizadas no Capítulo 4 referente a estas redes, os benefícios que as redes compactas e isoladas trazem à concessionária devem ser considerados no momento da priorização das obras de MT.

Na primeira simulação deste estudo de caso, os objetivos considerados foram: custo da obra, carregamento do alimentador relacionado e queda de tensão do alimentador.

As obras propostas para esta simulação são apresentadas na tabela 5.5.

Tabela 6.7 – Relação de obras propostas para o Caso III

Nº OBRA	ALIMENTADOR	CUSTO (R\$)	CARREGAMENTO (%)	ΔV (%)	ΔFEC	Descrição	JUSTIFICATIVA
1	IAL-02 (RC)	675.224,75	67,52	8,1	12,0	Construção do novo alimentador para atender conjunto de Apiúna.	Aumentar a confiabilidade do circuito e melhorar os indicadores DEC e FEC.
2	TBO-03 (RC)	106.036,89	40,71	4,6	9,5	Substituir cabo do alimentador TBO-03 para atender conjunto de Dr Pedrinho e Benedito Novo.	Aumentar a confiabilidade do circuito.
3	BSO-01	51.033,06	71,25	0,7	0,7	Construção do novo trecho de alimentador para atender conjunto de Blumenau.	Aumentar a confiabilidade do circuito.
4	BND-05	24.179,50	82,35	8,7	1,5	Construção de rede para interligar alimentadores.	Possibilitar transferência de carga, além de aumentar a confiabilidade do circuito.
5	GPR-9	10.027,17	72,22	4,9	1,8	Construção de rede para interligar alimentadores.	Possibilitar transferência de carga, além de aumentar a confiabilidade do circuito.
6	IAL-04 (RC)	262.990,10	75,00	2,3	10,9	Construção do novo alimentador e substituindo cabo para atender conjunto de Indaial.	Aumentar a confiabilidade do circuito.
7	TBO-05	101.898,51	67,38	5,1	0,3	Substituir cabo do alimentador TBO-05.	Reducir carregamento percentual e aumentar a confiabilidade do circuito.
8	TBO-01 (RC)	210.616,43	42,03	2,8	14,0	Substituir cabo do alimentador TBO-01.	Não atendimento dos requisitos mínimos exigidos pela ANEEL e aumentar a confiabilidade do circuito.
9	ISL-04	75.354,96	74,90	9,7	0,5	Construção de rede para interligar alimentadores.	Remanejamento de carga entre alimentadores para evitar corte de carga neste conjunto. Ganho na Confiabilidade.
10	TJS-06	24.679,90	68,14	13,4	1,9	Construção de rede para interligar alimentadores.	Possibilidade de remanejamento de carga entre alimentadores TJS-06 e TJS-01, com ganhos para os índices FEC e DEC.

11	RCO-03 (RI)	134.516,14	99,42	4,6	10,3	Substituir cabo do alimentador RCO-03.	Possibilidade de melhor atendimento aos clientes da região, com ganhos para FEC,DEC, carregamento e nível de tensão.
12	TJS-04	13.498,24	68,91	6,0	6,0	Substituir cabo do alimentador TJS-04.	Redução de problemas causados pela Cooperativa de Energia Esteves Junior (Cerej).
13	ICO-06 (RC)	376.963,93	76,84	5,0	9,5	Construção de rede para interligar alimentadores.	Remanejamento de carga entre alimentadores para evitar corte de carga neste conjunto. Ganho na Confiabilidade.

Custo Total	2.067.019,58
-------------	--------------

Na tabela acima, as indicações “RC” e “RI” indicam rede compacta e rede isolada, respectivamente.

Levando em conta as obras apresentadas acima, o resultado obtido na simulação é verificado na tabela 6.8.

Tabela 6.8 – Relação de planos de expansão gerado para o caso III, simulação 1

Plano\Obra	Obra 1	Obra 2	Obra 3	Obra 4	Obra 5	Obra 6	Obra 7	Obra 8	Obra 9	Obra 10	Obra 11	Obra 12	Obra 13	Custo do Plano de Expansão
Plano 1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	88.853,20
Plano 2	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	268.757,67
Plano 3	0	0	0	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	761.118,35
Plano 4	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	285.584,06
Plano 5	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	136.415,19
Plano 6	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	175.247,42
Plano 7	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	309.763,56
Plano 8	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	323.261,80
Plano 9	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	244.435,77
Plano 10	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0	295.110,83
Plano 11	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	185.274,59
Plano 12	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	0	1	0	198.772,83
Plano 13	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	319.790,73
Plano 14	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	0	333.288,97
Plano 15	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	710.252,90
Plano 16	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	543.905,40
Plano 17	0	0	1	1	1	0	1	0	1	1	1	0	1	798.653,17
Plano 18	0	0	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	0	435.187,48
Plano 19	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	1	959.744,76
Plano 20	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	596.279,07
Plano 21	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	973.243,00
Plano 22	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	0	793.397,26
Plano 23	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	291.311,48
Plano 24	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	0	1	1	681.773,65

Plano 25	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	425.827,62
Plano 26	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	0	439.325,86
Plano 27	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	816.289,79
Plano 28	0	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	0	1	904.690,06
Plano 29	1	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	995.015,48
Plano 30	1	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1.385.477,65
Plano 31	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1.321.028,66
Plano 32	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	1.101.052,37
Plano 33	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	1	1.688.632,73

Fazendo uma verificação global do resultado apresentado acima, pode-se perceber que as obras 1, 2, 6, 7, 8 e 13 tiveram pouca incidência⁵ na tabela com os planos de expansão gerados. Isso ocorreu devido a estas obras serem relativamente onerosas e não trazerem tanto benefício do ponto de vista dos objetivos de carregamento e queda de tensão (ver Apêndice A.3). O tempo de simulação foi de 3 segundos e 85 centésimos.

Avaliando o restante das obras, principalmente as obras 3, 4, 5, 9, 10 e 11, estas têm uma grande incidência na tabela 6.8 devido a serem obras relativamente baratas e terem pelo menos outro objetivo em situação de valor elevado (nos casos de carregamento e queda de tensão percentual)⁶.

Analizando detalhadamente a obra 11, apesar da mesma ter um custo mediano em comparação as outras obras (R\$ 134.516,14), a mesma está com o carregamento percentual bastante elevado (99,42%) e uma queda de tensão percentual razoável (4,6%). Isso faz com que a obra tenha uma boa incidência sobre os planos de expansão propostos.

Em uma segunda simulação realizada para as mesmas obras propostas nesta seção, foi considerado um critério a mais, o “delta FEC”, que seria a variação do FEC que a obra proposta proporcionaria, a partir da sua execução. Isso foi realizado para avaliar como a rotina computacional se comportaria, no que diz respeito às obras de rede compacta e isolada, já que estas, como colocado anteriormente (Capítulo 4), proporcionam uma maior confiabilidade e qualidade no fornecimento de energia, reduzindo consideravelmente os índices DEC e FEC do conjunto considerado.

⁵ Número de vezes que determinada obra aparece na tabela de planos de expansão gerada pela rotina computacional dividido pelo número total de planos de expansão gerados vezes 100 (%).

⁶ Ver dados de carregamento e queda de tensão percentuais dos alimentadores no apêndice A.

Tabela 6.9 – Relação de planos de expansão gerado para o caso III, simulação 2

Plano\Obra	Obra 1	Obra 2	Obra 3	Obra 4	Obra 5	Obra 6	Obra 7	Obra 8	Obra 9	Obra 10	Obra 11	Obra 12	Obra 13	Custo do Plano de Expansão
Plano 1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	113.533,10
Plano 2	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1	1	0	482.845,17
Plano 3	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	1	0	611.319,13
Plano 4	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	0	745.835,27
Plano 5	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	847.733,78
Plano 6	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	755.862,44
Plano 7	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	857.760,95
Plano 8	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	323.261,80
Plano 9	0	0	1	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	520.379,99
Plano 10	0	0	1	1	0	0	1	1	0	1	1	1	0	560.421,78
Plano 11	0	0	1	1	0	1	0	0	1	1	1	1	0	586.251,90
Plano 12	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	0	430.186,42
Plano 13	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	564.702,56
Plano 14	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	503.543,13
Plano 15	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1.129.301,63
Plano 16	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0	1	1	0	803.012,76
Plano 17	0	1	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	0	827.692,66
Plano 18	0	1	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1.204.656,59
Plano 19	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1.214.683,76
Plano 20	0	1	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	364.767,39
Plano 21	0	1	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	378.265,63
Plano 22	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	1	1	0	513.527,10
Plano 23	0	1	0	1	0	0	0	1	1	0	0	1	0	429.686,02
Plano 24	0	1	0	1	0	0	0	1	1	0	1	1	0	564.202,16
Plano 25	0	1	0	1	0	0	0	1	1	1	0	1	0	454.365,92
Plano 26	0	1	0	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	575.383,82
Plano 27	0	1	0	1	0	0	0	1	1	1	1	1	0	588.882,06
Plano 28	0	1	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	690.780,57
Plano 29	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0	506.739,59
Plano 30	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	1	1	0	641.255,73
Plano 31	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	0	738.339,06
Plano 32	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0	751.837,30
Plano 33	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0	0	763.018,96
Plano 34	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	1	0	776.517,20
Plano 35	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1.153.481,13
Plano 36	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0	1	1	0	827.192,26
Plano 37	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0	1	1	1	1.204.156,19
Plano 38	0	1	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	0	703.857,78
Plano 39	0	1	0	1	0	1	0	1	1	1	0	1	0	717.356,02
Plano 40	0	1	0	1	0	1	0	1	1	1	1	0	0	838.373,92
Plano 41	0	1	0	1	0	1	0	1	1	1	1	0	1	1.215.337,85
Plano 42	0	1	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	0	851.872,16
Plano 43	0	1	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1.228.836,09
Plano 44	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	0	1	0	819.254,53
Plano 45	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	953.770,67
Plano 46	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1.330.734,60
Plano 47	0	1	0	1	1	0	0	0	1	1	1	1	0	388.292,80
Plano 48	0	1	0	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	598.909,23
Plano 49	0	1	0	1	1	1	0	1	0	1	0	1	0	652.028,23
Plano 50	0	1	0	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1.163.508,30
Plano 51	0	1	0	1	1	1	0	1	1	0	1	0	0	823.721,19
Plano 52	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	0	0	848.401,09

Plano 53	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1.225.365,02
Plano 54	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	861.899,33
Plano 55	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1.238.863,26
Plano 56	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	990.651,40
Plano 57	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	741.813,63
Plano 58	0	1	1	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	1	667.608,89
Plano 59	0	1	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0	1	557.772,65
Plano 60	0	1	1	1	0	1	0	1	0	1	1	1	0	1	827.550,26
Plano 61	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1.004.803,73
Plano 62	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1.381.767,66
Plano 63	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	554.301,58
Plano 64	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1.014.830,90
Plano 65	1	1	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1.502.917,41
Plano 66	1	1	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	1	1	1.790.527,74
Plano 67	1	1	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	1	1	1.804.025,98
Plano 68	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	1	0	1	1.451.741,95
Plano 69	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1.828.705,88
Plano 70	1	1	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	0	0	1.513.598,67
Plano 71	1	1	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1.890.562,60
Plano 72	1	1	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1.527.096,91
Plano 73	1	1	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1.904.060,84
Plano 74	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1.628.995,42
Plano 75	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1.537.124,08
Plano 76	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1.914.088,01
Plano 77	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1.578.129,97
Plano 78	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2.056.992,41

Avaliando a incidência das obras 2, 6, 8 e 11 na tabela 6.9, onde as três primeiras são obras que utilizam tecnologia de rede compacta e a última de rede isolada, é possível verificar que, devido à inclusão do critério FEC, os níveis de incidência destas obras nos planos de expansão apresentados acima, quando comparado com a tabela 5.7, aumentaram de 24,24%, 12,12%, 12,12% e 78,79% para 85,9%, 75,64%, 84,62% e 84,62% respectivamente. Isso mostra a importância de se avaliar corretamente os objetivos que serão utilizados para realização da priorização de obras. O tempo de processamento foi de 4 segundos e 22 centésimos.

As outras obras propostas, com o uso de tecnologia de rede compacta e isolada (obras 1 e 13) não sofreram mudanças consideráveis com relação a estas incidências devido as mesmas serem extremamente onerosas, quando comparadas com a relação de obras propostas, penalizando de forma considerável a função de avaliação referente ao custo do plano de expansão.

6.6 Considerações Finais do Capítulo

A partir dos resultados apresentados neste capítulo, foi possível realizar a validação da metodologia para a definição de uma lista de planos de expansão, relacionando obras priorizadas, a serem executadas por parte da concessionária, em um determinado período, com uma quantidade limitada de recursos disponível a ser investido do Programa de Construção/Reforma de Alimentadores, utilizando uma abordagem baseada em conjuntos de Pareto.

O estudo de Caso I apresentou uma simulação onde o planejador decidiu investir um valor entre R\$ 210.000,00 e R\$ 220.000,00 no Programa de Construção/Reforma de Alimentadores.

Os resultados apresentados pela tabela 5.2 foram satisfatórios, onde foi possível realizar uma análise mais detalhada a respeito das obras nº 3 e nº 6, onde a primeira possui uma alta relação benefício/custo, sendo uma forte candidata a ser executada, e a segunda, baixa relação, estando esta passível de ficar fora do plano de expansão.

Já o estudo de Caso II teve o objetivo de avaliar a priorização realizada por parte da rotina computacional, onde se decidiu realizar duas simulações com uma lista de obras propostas com apenas 5 obras. A primeira foi executada e as informações apresentadas pela rotina foram avaliadas e validadas, pois, observando a solução obtida com a apresentada pelos especialistas da concessionária, o plano escolhido pelos mesmos foi o 3, contemplando as obras nº 1 e 4.

Com relação à segunda simulação, foram alterados os dados de número de consumidores beneficiados e da queda de tensão percentual no alimentador relacionado à obra 3, para valores muito baixos (10 (dez) consumidores e -1,5% respectivamente), fazendo com que a mesma, dentre as obras listadas, seja a de menor relação benefício/custo, sendo esta a mais onerosa. Os resultados esperados foram alcançados para este estudo de caso, pois com a alteração dos valores das variáveis citadas a cima, a rotina computacional se comportou de forma adequada, apresentando resultado coerente.

O estudo de Caso III teve a finalidade de avaliar a importância da utilização dos objetivos adequados no momento da avaliação do plano de obras, devido a alguns tipos de redes utilizadas atualmente nos sistemas de distribuição possuírem características diferenciadas quando comparadas com as redes aéreas convencionais, por exemplo, maior confiabilidade e maior custo.

Assim como no estudo de Caso II, foram realizadas duas simulações no estudo de Caso III, a primeira utilizando os objetivos **custo da obra, carregamento e queda de tensão percentuais dos alimentadores relacionados**, e na segunda foi incluído o critério “**delta FEC**”.

Com a inclusão destes objetivos, e devido aos benefícios que as redes compactas e isoladas trazem à concessionária, no que diz respeito à confiabilidade e qualidade da energia, chegou-se à conclusão de que os mesmos devem ser considerados no momento da priorização das obras de MT, para que estes benefícios possam ser agregados ao problema.

CAPÍTULO

7

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este último capítulo apresenta as considerações finais sobre os assuntos abordados neste trabalho, principalmente aquelas relacionadas ao método para priorização de obras em sistemas de distribuição utilizando uma abordagem baseada em conjuntos de Pareto. Além disso, são apresentadas algumas sugestões para novas pesquisas que podem ser amplamente exploradas a partir das contribuições evidenciadas neste trabalho.

7.1 Considerações Finais

O problema de planejamento da distribuição, particularmente no que tange à priorização de obras, é um problema complexo, com muitas variáveis e objetivos a serem otimizados, onde alguns destes são conflitantes. Nesse sentido, métodos tradicionais de otimização mono-objetivo não são aplicáveis, estimulando a aplicação de métodos heurísticos e multiobjetivos.

A maioria das abordagens da literatura que trata do problema de priorização de obras da distribuição, considera, em geral, apenas aspectos tradicionais de planejamento, tais como: perdas, queda de tensão, custo, carregamento; não considerando, por exemplo, aspectos importantes como impacto previsto da obra nos índices DEC de FEC e número de consumidores que serão beneficiados com as obras.

Nessa proposta foi desenvolvida uma metodologia e um modelo computacional aplicado ao problema de planejamento de sistemas de distribuição de energia elétrica, envolvendo a priorização de obras para a determinação de um plano indicativo otimizado de investimentos em redes de MT, para que o planejador possa realizar um processamento dessas informações e executar o plano de expansão que o mesmo julgar mais conveniente para a concessionária, do ponto de vista da relação benefício/custo.

Este plano é gerado a partir de um plano geral de obras, que leva em conta algumas características de cada um dos alimentadores em estudo.

Para a modelagem deste problema, foi utilizado um método heurístico para otimização multiobjetivo, envolvendo a técnica de algoritmos genéticos e a teoria da fronteira ótima de Pareto.

A utilização de um método heurístico para otimização multiobjetivo, envolvendo a técnica de algoritmos genéticos e a teoria da fronteira ótima de Pareto possibilitou a modelagem deste problema, além da consideração de vários critérios de planejamento, como:

- queda de tensão percentual do alimentador relacionado;
- custo de cada obra proposta para ingressar no plano de expansão (em R\$);
- carregamento percentual do alimentador que receberá a obra;
- número de consumidores que serão beneficiados pela obra; e

- variação do FEC do alimentador relacionado.

Por meio da rotina computacional desenvolvida, foram executadas simulações para validar a metodologia proposta neste trabalho, onde os resultados esperados foram alcançados, conforme delineados a seguir.

Na simulação do estudo de Caso I, o planejador decidiu investir um valor entre R\$ 210.000,00 e R\$ 220.000,00 no Programa de Construção/Reforma de Alimentadores.

De acordo com os critérios estabelecidos, a rotina computacional selecionou os planos de expansão que tiveram uma melhor relação benefício/custo, ou seja, obras que tenham o menor custo, beneficie a maior quantidade de consumidores e que estejam relacionadas com alimentadores que tenham alta queda de tensão, isto é, alimentadores que justifiquem o investimento para melhoria do nível de tensão.

No estudo de caso II, primeira simulação, observou-se que o plano escolhido pelos especialistas da concessionária em questão foi o mesmo indicado pela rotina computacional, dada a consideração de uma restrição orçamentária de R\$ 500.000,00.

Na segunda simulação, a rotina apresentou um resultado satisfatório, onde aquelas obras com baixa relação benefício/custo não foram selecionadas para os planos de expansão.

Ao observar o estudo de caso III, realizando um comparativo entre a primeira e a segunda simulação, foi possível observar a importância da utilização dos objetivos adequados no momento da avaliação do plano de obras, devido a alguns tipos de redes utilizadas atualmente nos sistemas de distribuição possuírem características diferenciadas, quando comparadas com as redes aéreas convencionais.

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

7.2 Sugestões para trabalhos futuros

Para que novos trabalhos relacionados ao que foi abordado nesta dissertação possam ser realizados, seguem abaixo algumas sugestões:

- Quantificar, em R\$, os benefícios que a concessionária tem com a aplicação da metodologia proposta, no que diz respeito aos ganhos proporcionados pela execução das obras selecionadas pela rotina computacional em cada estudo de caso;
- Incluir ações de operação e manutenção na lista de obras/atividades a serem executadas, com o intuito de realizar uma priorização global de ações a serem tomadas pela Diretoria Técnica da concessionária;
- Realizar um estudo detalhado para ponderação dos critérios, avaliando qual destes é mais importante para a empresa, verificando a relevância de cada um em termos de custo/retorno financeiro.

APÊNDICE A

Dados Operacionais dos Alimentadores

Os dados dos alimentadores apresentados neste apêndice foram adquiridos do sistema de distribuição de uma concessionária real, a partir de um programa nomeado “**Supervisão da Distribuição (SD)**”, que faz leituras periódicas e armazena alguns parâmetros de rede em determinados pontos do sistema.

A partir da aquisição de informações da rede (despacho de carga, potência dos transformadores de distribuição instalados, pontos de medição direta em determinados trechos dos alimentadores, etc.), é realizado o cálculo do fluxo de potência de todos os alimentadores da concessionária. A partir deste, são armazenados os valores de carregamento e queda de tensão no pior trecho de cada um dos alimentadores e no horário de pico (maior demanda), isto é, valores máximos.

As informações contidas neste apêndice são dados do sistema de distribuição antes da execução das obras propostas em cada estudo de Caso apresentado neste trabalho.

Os campos informados nas tabelas abaixo são:

- **Alimentador:** Nome do alimentador;
- **Carregamento (%):** Carregamento percentual do alimentador, adquirido a partir do sistema SD e calculado com base na capacidade de condução de corrente do cabo instalado;
- **Tensão Nominal (kV) – (A):** Tensão nominal do alimentador;
- **Tensão Nominal Mínima do Alimentador (kV) – (B):** Tensão mínima do alimentador, adquirida a partir do sistema SD;
- **Queda de Tensão:** Valor de queda de tensão calculado:
$$(C) = (B) / (A);$$
- **Queda de Tensão Relativa à Tensão Nominal (%):** Valor calculado de queda de tensão relativa:
$$(D) = 1 - (C) \times 100\%$$

A.1 Dados para o Estudo de Caso I

Alimentador	Carregamento (%)	Tensão Nominal (kV)	Tensão Nominal Mínima do Alimentador (kV)	Queda de Tensão	Queda de Tensão Relativa à Tensão Nominal (%)
RNO01	54,05	13,8	12,94733	0,938	6,2
RNO02	52,55	13,8	13,36267	0,968	3,2
RNO03	44,67	13,8	13,42537	0,973	2,7
RNO04	62,88	13,8	13,25891	0,961	3,9
RNO06	36,67	13,8	13,70284	0,993	0,7
SBB03	52,55	13,8	13,14205	0,952	4,8
SBB04	40,79	13,8	13,26587	0,961	3,9
SBB05	48,14	13,8	13,3907	0,97	3,0
SBB06	48,16	13,8	12,78664	0,927	7,3
SBS01	48,07	13,8	13,77777	0,998	0,2
SBS02	54,54	13,8	13,19256	0,956	4,4
SBS03	51,27	13,8	13,6664	0,99	1,0
SBS04	17,65	13,8	13,83689	1,003	-0,3
SBS05	56,67	13,8	13,0671	0,947	5,3
SBS06	57,84	13,8	12,79121	0,927	7,3
SBS07	52,49	13,8	13,58919	0,985	1,5
SBS08	65,41	13,8	13,46735	0,976	2,4
SBS09	38,54	13,8	13,42461	0,973	2,7

A.2 Dados para o Estudo de Caso II

Alimentador	Carregamento (%)	Tensão Nominal (kV)	Tensão Nominal Mínima do Alimentador (kV)	Queda de Tensão	Queda de Tensão Relativa à Tensão Nominal (%)
ATA01	26,11	23	22,84289	0,993	0,7
ATA02	26,94	23	23,36037	1,016	-1,6
COA01	53,24	13,8	12,91023	0,936	6,4

COA02	20,43	13,8	13,09344	0,949	5,1
COA03	54,71	13,8	12,80262	0,928	7,2
COA04	68,21	13,8	13,65292	0,989	1,1
COA05	58,5	13,8	12,95212	0,939	6,1
COA06	61,01	13,8	12,66199	0,918	8,2
COA07	47,35	13,8	13,82794	1,002	-0,2
COA08	27,13	13,8	14,10855	1,022	-2,2
FGS01	40,74	23	22,04062	0,958	4,2
FGS02	30,1	23	23,14326	1,006	-0,6
FGS03	30,74	23	22,42602	0,975	2,5
FGS04	14,2	23	22,76943	0,99	1,0
IRM01	16,81	23	22,78755	0,991	0,9
IRM04	52,29	23	23,2121	1,009	-0,9
SRA01	37,71	23	22,30752	0,97	3,0
SRA02	70,59	23	23,54184	1,024	-2,4
SRA03	46,43	23	21,87133	0,951	4,9
SRA04	35,28	23	22,40864	0,974	2,6
SRA05	18,39	23	23,31532	1,014	-1,4

A.3 Dados para o Estudo de Caso III

Alimentador	Carregamento (%)	Tensão Nominal (kV)	Tensão Nominal Mínima do Alimentador (kV)	Queda de Tensão	Queda de Tensão Relativa à Tensão Nominal (%)
BQB01	68,04	13,8	12,4968	0,906	9,4
BQB02	34,9	13,8	13,44121	0,974	2,6
BQB03	42,75	13,8	13,40257	0,971	2,9
BQB04	68,82	13,8	12,97107	0,94	6
BQB05	94,91	13,8	12,35593	0,895	10,5
CQS01	74,68	13,8	13,27339	0,962	3,8
CQS02	56,86	13,8	13,16963	0,954	4,6
CQS03	67,25	13,8	13,03614	0,945	5,5
CQS04	39,22	13,8	13,49702	0,978	2,2
CQS05	57,84	13,8	12,97126	0,94	6
CQS07	38,24	13,8	13,45786	0,975	2,5

CQS09	15,24	13,8	13,5624	0,983	1,7
CQS10	80,39	13,8	13,64463	0,989	1,1
CQS11	37,71	13,8	13,24122	0,96	4
CQS12	62,72	13,8	13,34694	0,967	3,3
CQS13	61,57	13,8	13,55632	0,982	1,8
GCR01	0	23	23	1	0
ICO02	68,78	13,8	13,48177	0,977	2,3
ICO03	57,28	13,8	13,60142	0,986	1,4
ICO04	65,49	13,8	13,63373	0,988	1,2
ICO05	53,73	13,8	13,13852	0,952	4,8
ICO06	76,84	13,8	13,11418	0,95	5,0
ICO07	53,14	13,8	13,59173	0,985	1,5
ICO08	57,28	13,8	13,56448	0,983	1,7
ICO09	14,31	13,8	13,76932	0,998	0,2
ICO10	20,39	13,8	13,84883	1,004	-0,4
ICO11	56,1	13,8	13,75091	0,996	0,4
ICO12	73,94	13,8	13,64483	0,989	1,1
INE01	0	13,8	13,8	1	0
INE02	108,82	13,8	12,17818	0,882	11,8
INE03	49,02	13,8	13,21606	0,958	4,2
INE04	62,75	13,8	13,31755	0,965	3,5
INE05	107,94	13,8	12,48914	0,905	9,5
INE06	70	13,8	12,758	0,924	7,6
INE07	53,73	13,8	13,24419	0,96	4
INE08	85,88	13,8	12,96818	0,94	6
INE09	73,33	13,8	12,37273	0,897	10,3
INE10	88,16	13,8	12,75416	0,924	7,6
INE11	69,41	13,8	12,65919	0,917	8,3
ISL01	64,62	13,8	12,36753	0,896	10,4
ISL02	35,1	13,8	12,97779	0,94	6
ISL03	41,96	13,8	11,68883	0,847	15,3
ISL04	74,9	13,8	12,46706	0,903	9,7
ISL05	31,37	13,8	13,27539	0,962	3,8
PLA04	90,05	13,8	12,4232	0,9	10
PLA05	82,31	13,8	11,69579	0,848	15,2
PLA06	70	13,8	12,61891	0,914	8,6
PLA07	56,08	13,8	13,01351	0,943	5,7
PLA08	60,84	13,8	12,72994	0,922	7,8

PLA09	61,69	13,8	13,38161	0,97	3
PLA10	94,9	13,8	11,86375	0,86	14
PLA11	97,2	13,8	11,25888	0,816	18,4
RCO01	90,03	13,8	13,50379	0,979	2,1
RCO02	67,84	13,8	12,79619	0,927	7,3
RCO03	99,42	13,8	13,16975	0,954	4,6
RCO04	67,01	13,8	13,09826	0,949	5,1
RCO05	61,83	13,8	13,38607	0,97	3
RCO06	74,62	13,8	12,60212	0,913	8,7
RCO07	60,78	13,8	12,86766	0,932	6,8
RCO08	64,31	13,8	12,68207	0,919	8,1
RCO09	73,33	13,8	12,45954	0,903	9,7
RCO10	61,76	13,8	12,65124	0,917	8,3
RCO11	33,01	13,8	13,68095	0,991	0,9
RCO12	0	13,8	13,8	1	0
RCO13	64,71	13,8	12,47909	0,904	9,6
TDE01	55,92	13,8	13,09848	0,949	5,1
TDE02	54,51	13,8	13,35098	0,967	3,3
TDE03	65,49	13,8	13,17032	0,954	4,6
TDE04	71,18	13,8	13,33374	0,966	3,4
TDE05	65,69	13,8	12,87757	0,933	6,7
TDE06	84,56	13,8	13,12602	0,951	4,9
TDE07	48,82	13,8	13,40336	0,971	2,9
TDE08	70,26	13,8	12,14928	0,88	12
TDE09	48,36	13,8	13,1431	0,952	4,8
TDE10	40,38	13,8	13,63144	0,988	1,2
TJS01	94,37	23	21,54827	0,937	6,3
TJS02	70,29	23	23,03533	1,002	-0,2
TJS03	45,88	23	23,49162	1,021	-2,1
TJS04	68,91	23	21,62185	0,94	6,0
TJS05	31,18	23	23,59809	1,026	-2,6
TJS06	68,14	23	19,92705	0,866	13,4
UGA01	75	13,8	7,48006	0,542	45,8
UGA02	9,29	13,8	13,22096	0,958	4,2
BBV01	59,74	23	22,25595	0,968	3,2
BBV02	28,21	23	22,95573	0,998	0,2
BBV03	59,03	23	22,62336	0,984	1,6
BBV04	38,37	23	22,95488	0,998	0,2

BGA21	74,71	23	22,7836	0,991	0,9
BGA22	55,53	23	22,42125	0,975	2,5
BGA23	55,74	23	22,67624	0,986	1,4
BGA24	53,75	23	23,45991	1,02	-2
BGA25	38,36	23	24,11708	1,049	-4,9
BGA26	18,24	23	23,79294	1,034	-3,4
BGA27	41,97	23	23,22303	1,01	-1
BGA28	69,53	23	23,80385	1,035	-3,5
BGA29	64,46	23	23,49328	1,021	-2,1
BGA30	59,4	23	23,59159	1,026	-2,6
BND01	86,37	23	20,82284	0,905	9,5
BND03	73,12	23	22,64025	0,984	1,6
BND04	9,69	23	24,35231	1,059	-5,9
BND05	82,35	23	21,00287	0,913	8,7
BND06	56,02	23	22,81191	0,992	0,8
BND07	69,08	23	21,84297	0,95	5
BND08	61,07	23	22,29507	0,969	3,1
BND09	78,13	23	21,58772	0,939	6,1
BND16	56,87	13,8	12,77782	0,926	7,4
BND17	45,8	13,8	12,86778	0,932	6,8
BQE01	42,94	23	23,5075	1,022	-2,2
BQE02	47,35	23	24,02632	1,045	-4,5
BQE03	70,05	23	22,98992	1	0
BQE04	74,76	23	23,37474	1,016	-1,6
BQE05	79,47	23	23,31254	1,014	-1,4
BQE06	70,29	23	23,24424	1,011	-1,1
BQE07	83,24	23	22,54044	0,98	2
BQE08	44,41	23	23,92668	1,04	-4
BRB01	75,15	23	23,3152	1,014	-1,4
BRB02	57,9	23	22,39387	0,974	2,6
BRB03	80,65	23	22,43342	0,975	2,5
BRB05	93,11	23	21,18319	0,921	7,9
BRB06	53,09	23	23,1689	1,007	-0,7
BSO01	71,25	23	22,83447	0,993	0,7
BSO02	40,86	23	23,78484	1,034	-3,4
BSO03	89,68	23	22,46486	0,977	2,3
BSO05	39,12	23	23,69684	1,03	-3
BSO06	38,53	23	23,68719	1,03	-3

BSO07	12,35	23	24,06337	1,046	-4,6
BSO08	46,03	23	23,48608	1,021	-2,1
BSO09	61,49	23	23,2543	1,011	-1,1
BSO10	40,51	23	23,35871	1,016	-1,6
CRI01	12,12	13,8	13,04785	0,945	5,5
DPO01	34,43	13,8	13,4183	0,972	2,8
GPR09	72,22	23	21,86749	0,951	4,9
GPR10	44,76	23	22,62058	0,984	1,6
GPR11	69,14	23	22,64359	0,985	1,5
GPR12	63,51	23	22,88337	0,995	0,5
IAL01	34,91	23	22,78844	0,991	0,9
IAL02	67,52	23	21,14772	0,919	8,1
IAL03	59,51	23	23,71172	1,031	-3,1
IAL04	75	23	22,46121	0,977	2,3
LAS01	72,56	13,8	12,90511	0,935	6,5
MDA01	64,71	13,8	12,42695	0,901	9,9
RCS01	24,4	5	4,56803	0,914	8,6
RRA01	32,12	5	5,02428	1,005	-0,5
TBO01	42,3	23	22,34899	0,972	2,8
TBO02	56,53	23	22,51814	0,979	2,1
TBO03	40,71	23	21,94666	0,954	4,6
TBO04	74,12	23	23,29443	1,013	-1,3
TBO05	67,38	23	21,83274	0,949	5,1
TBO06	73,43	23	22,51626	0,979	2,1
TBO07	55,38	23	21,61445	0,94	6
TBO09	10,78	23	23,47032	1,02	-2
TBO10	75,41	23	23,09742	1,004	-0,4
URC01	16,36	23	23,36219	1,016	-1,6
URC02	5	23	23,30808	1,013	-1,3

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, L. H. *Paradigmas de Planejamento Tradicionais Versus Competitivos*. Artigo Interno. Labplan – UFSC. 2005.

ANEEL, *Relacionamento da ANEEL com a Sociedade*. Disponível em: www.aneel.gov.br. Acesso em Junho de 2009.

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

ANTUNES, A. U. - *Metodologia para Planejamento Agregado de Investimentos em Redes de Distribuição Secundárias*. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1999.

ANTUNES, A.U.; KAGAN, N.; BURGOS, A.M. et al. Metodologia para Priorização de Projetos de Investimentos para os Vários Níveis de Tensão de uma Empresa Distribuidora de Energia Elétrica. In: Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica. *Anais*. Brasília, DF, 2004. p. 463-477.

ASHLOCK, D. *Evolucionary Computation for Modeling and Optimization*, Springer + Business Media, Inc. Oct. 2005.

BEÊ, R.T. *Alocação de Bancos de Capacitores em Sistema de Distribuição de Energia Elétrica Utilizando Algoritmos Genéticos*. Curitiba, 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

BLANCHARD, M.; DELORME, L.; SIMARD, C. et al. *Experience with Optimization Software for Distribution System Planning*. In: Power Systems, IEEE Transactions on Volume 11, No. 4, p. 1891-1898, Nov. 1996

BOULAXIS, N.G.; PAPADOPOULOS, M.P.; *Optimal Feeder Routing in Distribution System Planning Using Dynamic Programming Technique and GIS Facilities*. In: Power Delivery, IEEE Transactions on Volume 17, No. 1, p. 242-247, Jan. 2002.

BRAZ, H.D.M; SOUZA, B.A; ALVES, H.N. Programação Evolutiva para Planejamento da Expansão de Redes de Distribuição. In: IEEE T&D2004 Latin America. *Proceedings*. São Paulo, 2004.

BRAZ, H.D.M; SOUZA, B.A; ALVES, H.N. et al. Um Algoritmo Genético para Implantação de Redes de Distribuição. In: Congresso Brasileiro de Automática. *Anais*. Rio Grande do Sul, 2004.

CARRANO, E. G.; NETO, O. M.; TAKAHASHI, R. H. C.; Projeto de Redes Ótimas de Distribuição de Energia Elétrica. In: Seminário em Sistemas de Potência, Automação e Controle. *Anais*. Juiz de Fora, 2003.

CARVALHO, P.M.S.; FERREIRA, L.A.F.M.; LOBO, F.G. et al. Distribution Network Expansion Planning Under Uncertainty: A Hedging Algorithm in an Evolutionary Approach. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 15, No 1, p. 412-416, Jan. 2000.

CASTRO, R.E. *Otimização de Estruturas com Multiobjetivos Via Algoritmos Genéticos*. Rio de Janeiro, 2001. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

CELESC DISTRIBUIÇÃO S.A. *Padrões para Estruturas de Rede de Distribuição Aérea Primária Compacta com Cabo Coberto em Espaçadores*. NE-102E. Florianópolis, 2009.

_____. *Padrões para Estruturas de Rede de Distribuição Aérea Primária Multiplexada* NE-111E. Florianópolis, 2008.

CHENG, F. Y.; LI, D. “*Multiobjective Optimization Design with Pareto Genetic Algorithm*”. *Journal of Structural Engineering*, pg. 1252-1261. Sep. 1997.

CHOI, J. H.; PARK, C. H.; CHAE, W. K. et al. An Improved Investment Priority Decision Method for the Electrical Facilities Considering Reliability of Distribution Networks. *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, Vol. 3, p. 396-402, June 2005.

COELHO, L. S.; Fundamentos, Potencialidades e Aplicações de Algoritmos Evolutivos. *Notas em Matemática Aplicada*, Sociedade Brasileira de Matemática Aplicada e Computacional, São Carlos, SP. 2003.

COSTA. A.M. *Otimização do Planejamento da Rede Secundária de Distribuição de Energia Elétrica*. Campinas, 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas.

CUNHA, A.J.B.; PINTO, E.L.F. Estudos para a Definição da Priorização da Manutenção. In: Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica. *Anais*. Minas Gerais, 2006. p. 1-8.

FERREIRA, L.A.F.M.; CARVALHO, P.M.S.; JORGE, L.A. et al. Optimal Distribution Planning by Evolutionary Computation – How to Make it Work. *Transmission and Distribution Conference and Exposition*, Vol. 1, p. 469 – 475, 2001.

FIGUEIREDO, J.N.; GONZAGA, C.C. Aplicação de Método de Busca em Grafos com Nós Parcialmente Ordenados à Locação de Torres de Transmissão. *Pesquisa Operacional*, v.23, n.1, p. 209-220, Jan. 2003.

FILHO, A.A. *Priorização de Investimentos em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica de Baixa Tensão*. Salvador, 2003. Dissertação (Mestrado em Regulação da Indústria de Energia) – Departamento de Engenharia e Arquitetura, Universidade Salvador.

FILHO, P.A.C. *Algoritmo Genético na Seleção de Variáveis em Calibração Multivariada de Dados Espectroscópicos*. Campinas, 1998. Dissertação (Mestrado em Química) – Instituto de Química, Universidade Estadual de Campinas.

FONSECA, C. M., FLEMING, J. P.; *Genetic Algorithms for Multiobjective Optimization: Formulation, Discussion and Generalization*. Fifth International Conference on Genetic Algorithms, 1993. 8p.

GALVÃO, C.O.; VALENÇA, M.J.S. *Sistemas Inteligentes: Aplicações em Recursos Hídricos e Sistemas Ambientais*. Ed. UFRGS / ABRH, Porto Alegre, 1999.

GARCIA, S.; GUERREIRO, R.; CORRAR, L.J. Teoria das Restrições e Programação Linear. In: Congresso Internacional de Custos. *Anais*. México, 1997.

GAULKE, E. *Metodologia para Determinação do Corte de Carga em Sistemas de Distribuição Utilizando Inteligência Artificial e Múltiplos Critérios*. Florianópolis, 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina.

GOLDBERG, D.E. *Genetic Algorithms in Search, Optimization & Machine Learning*. 1. ed. Addison-Wesley, 1989.

GOUVÉA, M.R. *Bases Conceituais para Planejamento de Investimento em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica*. São Paulo, 1993. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

GOUWANDA, D.; PONNAMBALAM, S. G. Evolutionary Search Techniques to Solve Set Covering Problems. In: Word Academy of Science, Engineerin and Technology. *Proceedings*. Vol. 29, p. 20-25, May 2008.

GTA. *Algoritmos Genéticos: Fundamentos e aplicações*. Grupo de Teleinformática e Automação. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Disponível em: www.gta.ufrj.br. Acesso em Agosto de 2008.

HAFFNER, S.; PEREIRA, L.A.; PEREIRA, L.F. et al. Modelo Multi-Estágio de Otimização para o Planejamento da Expansão de Sistemas de Distribuição. *Revista Controle e Automação*, Vol. 17, No. 4, p. 478-492, Nov. 2006.

HOLLAND, J. H. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. Ann Arbor: The University of Michigan Press. 1975. 211 p.

HORN, J.; NAFPLIOTIS, N.; GOLDBERG, D.E. A Niched Pareto Genetic Algorithm for Multiobjective Optimization. IEEE World Congress on Computational Intelligence. *Proceedings*. Vol. 1, p. 82-87, June 1994.

ICMC. *Algoritmos Genéticos*. Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação. Universidade de São Paulo – São Carlos. Disponível em: www.icmc.sc.usp.br. Acesso em Agosto de 2008.

IEAV. *Uma Análise da Situação da Energia Elétrica no Brasil*. Divisão de Energia Nuclear. Instituto de Estudos Avançados. Disponível em: www.ieav.cta.br. Acesso em Agosto de 2008.

ILAB. *Técnicas de Otimização*. Disponível em: www.ilab.com.br. Acesso em Agosto de 2008.

JONNAVITHULA, S.; BILLINTON, R. Minimum Cost Analysis of Feeder Routing in Distribution System Planning. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 11, No. 4, p. 1935-1940, Oct. 1996.

KAGAN, N.; OLIVEIRA, C.C.B. Goal Planning and Risk Analysis for Distribution Reliability Índices. In: International Conference and Exhibition on Electricity Distribution. *Proceedings*. Amsterdam, June 2001, No. 482.

KAGAN, N.; OLIVEIRA, C.C.B.; ANTUNES, A.U. et al. Metodologia para Priorização de Obras e Evolução Otimizada dos Indicadores de Continuidade. In: Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica. *Anais*. Brasília, DF, 2004. p. 456-471.

LECHETA, E.M. *Algoritmos Genéticos para Planejamento em Inteligência Artificial*. Curitiba, 2004. Dissertação (Mestrado em Informática) – Setor de Ciências Exatas, Universidade Federal do Paraná.

LI, F.; BROWN, R.E. A Cost-Effective Approach of Prioritizing Distribution Maintenance Based on System Reliability. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 19, No. 1, p. 439-441, Jan. 2004.

LIN, W.M.; SU, Y.S.; TSAY, M.T. Genetic Algorithm for Optimal Distribution System Planning. In: International Conference on Power System Technology. *Proceedings*. p. 241-245. Aug. 1998.

LINDEN, R. *Algoritmos Genéticos: Uma Importante Ferramenta da Inteligência Computacional*. 1. ed. Brasport, 2006.

MARTINS, V.M.; BORGES, C.T. Planejamento da Expansão de Sistemas de Distribuição Considerando Múltiplas Alternativas e Geração Distribuída Baseado em Algoritmos Genéticos. Congresso Brasileiro de Automática. *Anais*. Minas Gerais, 2008.

MENDOZA, F.; GARCIA, A.; BERNAL-AGUSTIN, J. L. *Application of the NPGA to the Design of Power Distribution Systems*. Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America, IEEE/PES, Aug. 2006, p. 1-5.

MIRANDA, V.; RANITO, J.V.; PROENÇA, L.M. Genetic Algorithm in Optimal Multistage Distribution Network Planning. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 9, No. 4, p. 1927-1933, Nov. 1994.

NARA, K.; KUWABARA, H.; KITAGAWA, M. et al. Algorithm for Expansion Planning in Distribution Systems Taking Faults into Consideration. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 9, No. 1, p. 324-330, Feb. 1994.

NGATCHOU, P.; ZAREI, A.; EL-SHARKAWI, M.A. In: Pareto Multi Objective Optimization. In: International Conference on Intelligent Systems Application to Power Systems. *Proceedings*. p. 84-91. Nov. 2005

- NJAIM, P.R. *Metodologias para Planejamento de Sistemas de Distribuição: Estado da Arte e Aplicações*. São Paulo, 1995. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- OENNING, V.; RODRIGUES, L.H.; CASSEL, R.A. et al. Teoria das Restrições e Programação Linear. Uma análise sobre o enfoque de otimização da produção. In: Encontro Nacional de Engenharia de Produção. *Anais*. Florianópolis, SC, 2004, p. 211-218.
- PACHECO, M.A.C. *Algoritmos Genéticos: Princípios e Aplicações*. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 1999. Disponível em: www.ica.ele.puc-rio.br. Acessado em agosto de 2008.
- PARETO, V. *Manual de Economia Política*, 1. ed. Abril Cultura, 1984.
- PENIN, C.A.S. *Análise de Índices de Qualidade no Planejamento Agregado de Investimentos em Ambiente de Incertezas*. São Paulo, 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- PRADO, D. *Programação Linear*. 1. ed. DG. 1999.
- RAMIREZ-ROSADO, I.J.; BERNAL-AGUSTIN, J.L. Genetic Algorithms Applied to the Design of Large Power Distribution Systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 13, No. 2, p. 696-703, May 1998.
- RAMIREZ-ROSADO, I.J.; GONEN, T. Pseudodynamic Planning for Expansion of Power Distribution Systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.6, No. 1, p. 245-254, Feb 1991.
- RESENDE, S.O.; *Sistemas Inteligentes – Fundamentos e Aplicações*, Vol.1. Manole, Bariri. 2003.
- SCALABRIN, I.; MORES, J. C.; BODANESE, R. E. et al. Programação Linear: Estudo de Caso com Utilização do Solver da Microsoft Excel. *Revista Universo Contábil*, v.2. n.2. p. 53-66. Maio/Ago. 2006.
- SCHAFFER, J. D.; *Some Experiments in Machine Learning Using Vector Evaluated Generic Algorithms*. (Doctoral Dissertation). Department of Electrical Engineering, Vanderbilt University, Tennessee, 1984.
- SCHUTZ, C.A. *Sistema Computacional para o Planejamento Otimizado da Expansão de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica*. Porto Alegre, 2006. Trabalho (Integração) – Faculdade de Engenharia, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul.
- SILVA, E. L. *Formação de Preços em Mercados de Energia Elétrica*. Porto Alegre: Sagra Luzzatto, 2001. 183 p.

SIMÕES, J. S. *Inter-Relação do Planejamento Agregado de Investimentos com o Planejamento Localizado de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica*. São Paulo, 1998. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

SOBRINHO, A.C.C.S.; GIRARDI, M.D.R. Uma Análise das Aplicações dos Algoritmos Genéticos em Sistemas de Acesso à Informação Personalizada. *Revista Eletrônica de Iniciação Científica*. Disponível em: www.sbc.org.br. Acesso em Agosto de 2008.

SPEARS, W. M.; JONG, K. A. D.; BÄCK, T. et. al. An Overview of Evolutionary Computation. *European Conference on Machine Learning*, vol. 667, p. 442–459, Vienna, Austria. 1993.

SQUAIELLA, D.J.F. *Planejamento Agregado em Redes de Distribuição Secundária – Modelo Alternativo para Empresas com Cadastro de Rede Reduzido*. São Paulo, 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

SRINIVAS, N.; DEB, K. Multiobjective Optimization Using Nondominated Sorting in Genetic Algorithms. *Evolutionary Computation*, v.2, n.3, p.221-248. 1994.

SZUVOVIVSKI, I. *Alocação Simultânea de Bancos de Capacitores e Reguladores de Tensão em Sistemas de Distribuição Usando Algoritmos Genéticos e Fluxo de Potência Ótimo*. Curitiba, 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

TEMRAZ, H.K.; QUINTANA, V.H. *Distribution System Expansion Planning Models: An Overview*. In: Electric Power Systems Research, V.26, No.1, p. 61-70, 1993.

VALENTE, A.L.C. *Modelo Probabilístico para Avaliação do Desempenho de Redes de Distribuição Primária*. São Paulo, 1997. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

VUINOVICH, F.; SANNINO, A.; IPPOLITO M.G. et al. *Considering Power Quality in Expansion Planning of Distribution Systems*, Power Engineering Society General Meeting, IEEE, June 2004, p. 6-10.

WALL, D.L.; THOMPSON, G.L.; NORTHCOTE-GREEN, J.E.D. An Optimization Model for Planning Radial Distribution Networks. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-98, No. 3, p. 1061-1068, May 1979.

YOSHIMOTO, E. *Planejamento de Redes Secundárias de Distribuição de Energia Elétrica*. Campinas, 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e de Computação) – Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas.

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).