

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA



**Método Stem Adaptado a Grafos: Expansão de
Geração de Sistemas Hidrotérmicos Considerando
Objetivos Econômicos e Ambientais**

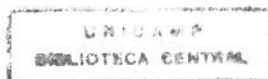
Autor : Chan Chiu Yuen

Orientador : Prof. Dr. Paulo de Barros Correia

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR Chan Chiu Yuen

E APROVADA PELA
COMISSÃO JULGADORA EM 17 / 05 / 96.

Paulo de Barros Correia
ORIENTADOR



3912650

UNIDADE	73C
N.º CHAMADA:	UNICAMP
	C36m
V.	Ex.
TOMBO BC/	34.001
PROC.	395/98
C	☐
D	☒
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	28/05/98
N.º CPD	

CM-00112971-4

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

C36m

Chan, Chiu Yuen

Método STEM adaptado a grafos: expansão de geração de sistemas hidrotérmicos considerando objetivos econômicos e ambientais / Chan Chiu Yuen. -- Campinas, SP: [s.n], 1996

Orientador: Paulo de Barros Correia
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica

1. Processo decisório por critérios múltiplos. 2. Pesquisa operacional. 3. Sistema de energia elétrica hidrotérmica. 4. Métodos interativos (Matemática). I. Correia, Paulo de Barros. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENERGIA
PLANEJAMENTO DE SISTEMA ENERGÉTICO**



**Método Stem Adaptado a Grafos: Expansão de
Geração de Sistemas Hidrotérmicos Considerando
Objetivos Econômicos e Ambientais**

Autor : Chan Chiu Yuen

Orientador : Prof. Dr. Paulo de Barros Correia

Curso: Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Térmica e Fluidos

Dissertação de mestrado apresentado à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Planejamento de Sistema Energético.

Campinas, 1996

S.P. - Brasil

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENERGIA
PLANEJAMENTO DE SISTEMA ENERGÉTICO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Método Stem Adaptado a Grafos: Expansão de
Geração de Sistemas Hidrotérmicos Considerando
Objetivos Econômicos e Ambientais**

Autor : Chan Chiu Yuen

Orientador : Prof. Dr. Paulo de Barros Correia



Prof. Dr. Paulo de Barros Correia , Presidente

Fac. de Eng. Mecânica - UNICAMP



Prof. Dr. Arnaldo César Walter

Fac. de Eng. Mecânica - UNICAMP



Prof. Dr. Luiz Jairo Machado Branco

UFSC - GSP/DEElétrica - CTC

Campinas, 20 de maio de 1996

Agradecimentos

- ao prof. Paulo Correia pela orientação, apoio e transmissão de conhecimento durante esses momentos que passamos juntos;
- ao prof. Bajay e Sérgio Ennes pelas sugestões e informações relevantes sobre o setor elétrico;
- aos professores do departamento de energia que colaboraram direta ou indiretamente com suas frutíferas sugestões no decorrer do trabalho;
- aos colegas e amigos pelas suas sugestões e alegre convivência: Perrela, Cristina, Claudinei, Valdecino, Máximo, Mammana, Cássia, Eliane, Magri, Camila, Cerqueira, Ednildo, Luiz Fernando, Miriam, Errera, Morandim, Mirkos, Lourenço e todos aqueles que porventura não tenham sido citados;
- àqueles colegas e amigos que ajudaram nas correções do português deste trabalho;
- aos funcionários Neusa, Rodrigues, Márcia, Ester, Vera e todo o pessoal que apoiou este trabalho;
- ao DE e UNICAMP pelo apoio didático e material;
- e finalmente, à FAPESP pelo apoio financeiro.

Dedicatória

Dedico este trabalho aos meus pais que me apoiaram em todos os momentos da minha vida.

Apresentação

Este texto propõe uma nova metodologia para a seleção de alternativas no planejamento da expansão do parque gerador de energia elétrica utilizando vários critérios de seleção. Um estudo de caso aplica a metodologia para a expansão da geração do sistema interligado sul-sudeste utilizando critérios econômicos e ambientais.

A metodologia proposta envolve técnicas de otimização em grafo conservativo, programação inteira-mista e os métodos iterativos de programação multi-objetivo.

O capítulo 1 apresenta algumas considerações gerais do texto.

O capítulo 2 apresenta uma breve descrição dos assuntos relacionados ao setor de geração de energia elétrica, como por exemplo: o próprio setor de geração, as principais metodologias de planejamento de expansão, o mercado consumidor e os principais condicionantes ambientais na geração de energia elétrica.

O capítulo 3 apresenta as metodologias de programação multi-objetiva (PMO) dando ênfase aos métodos iterativos. Inicia-se com um breve histórico e alguns conceitos gerais de PMO. Em seguida, a descrição dos principais métodos de resolução do PMO, focalizando principalmente os métodos iterativos.

O capítulo 4 descreve a estrutura do algoritmo computacional, as principais mudanças feitas no algoritmo matemático com a inserção do grafo conservativo (GC), o algoritmo de *Branch-and-Bound* (B&B), a estrutura de dados e o algoritmo computacional proposto.

O capítulo 5 apresenta formalmente o estudo de caso e as principais considerações feitas no modelo matemático, tais como: critérios de seleção, alternativas de geração e requisitos de mercado.

No último capítulo, são apresentados os resultados e as conclusões obtidas a partir de simulações da interação entre o programa computacional com diversos tipos de decisores, onde cada simulação representa um tipo de decisor.

Quem te instruiu por um dia
é teu mestre por toda vida

Provérbio chinês

Índice

Agradecimentos	iii
Dedicatória	iv
Apresentação	v
Índice	vii
Índice de Figuras	ix
Índice de Tabelas	x
Notações	xi
Siglas	xiv
Resumo	xvi
Abstract	xvii

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO..... 1

1.1 - Considerações Gerais	1
1.2 - Envolvimento das Idéias	3

CAPÍTULO 2 SETOR ENERGÉTICO..... 4

2.1 - Introdução.....	4
2.2 - Planejamento de Expansão do Setor Elétrico	4
2.3 - Alternativas de Geração	5
2.3.1 - Alternativas Hídricas	6
2.3.2 - Alternativas Térmicas	8
2.3.3 - Outras Alternativas de Geração	10
2.4 - Mercado Consumidor.....	12
2.5 - Condicionantes Ambientais da Expansão do Sistema Hidrotérmico.....	13
2.5.1 - Emissão de Poluentes.....	14
2.5.2 - Área Alagada.....	15
2.6 - O planejamento de Expansão do Setor Elétrica Apresentado em uma Estrutura de Gafo	16

CAPÍTULO 3 METODOLOGIAS DE OTIMIZAÇÃO BASEADAS EM VÁRIOS OBJETIVOS..... 18

3.1 - Introdução.....	18
3.2 - Aspectos Históricos.....	20
3.3 - Conceitos Gerais	21
3.4 - Métodos de Resolução	22
3.4.1 - Métodos com Preferência Definida	23
3.4.2 - Métodos sem Preferência Definida.....	23

3.4.3 - Métodos com Articulação das Preferências ou Interativo	24
3.4.4 - Método STEM	27
CAPÍTULO 4 ALGORITMO COMPUTACIONAL	31
4.1 - Introdução.....	31
4.2 - Estrutura de Dados	32
4.3 - Estrutura do Algoritmo.....	33
4.3.1 - Módulo Multi-Objetivo (STEM-Grafo).....	33
4.3.2 - Módulo Inteiro (PIM/B&B) e Módulo Grafo (GC)	45
4.4 - Código Computacional.....	45
4.5 - Exemplo de Resultado Obtido pelo Programa	46
CAPÍTULO 5 ESTUDO DE CASO	49
5.1 - Definições do Problema	49
5.2 - Formulação Matemática.....	53
CAPÍTULO 6 RESULTADOS E CONCLUSÕES	54
6.1 - Resultados	54
6.2 - Conclusões	59
ANEXO 1 PROGRAMAÇÃO LINEAR.....	61
A1.1 - Método Simplex	61
ANEXO 2 PROGRAMAÇÃO INTEIRA MISTA	64
A2.1 - Métodos de Enumeração Implícita: Branch & Bound	65
ANEXO 3 GRAFO CONSERVATIVO	69
ANEXO 4 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	73

Índice de Figuras

2.1 Bacias Hidrográficas Brasileiras.....	7
2.2 Gasoduto Santa Cruz de La Sierra-São Paulo-Porto Alegre.....	9
2.3 Opções de Expansão da Oferta de Energia	17
3.1 Classificação Alternativa dos Métodos de PMO	19
4.1 Estrutura do Algoritmo	31
4.2 Região Factível Original	35
4.3 Região Factível Obtida pelo ponto r	36
4.4 Região Factível Obtida pelo STEM Original.....	37
4.5 Região Factível pelo Método STEM-G sem Ajuste	37
4.6 Região Factível com Coordenadas Positivas	38
4.7 Região Factível com Coordenadas Negativas.....	38
4.8 Comparação entre a Região Factível Original e a Região Factível obtida por Limitantes	39
4.9 A Busca do Ponto de Ajuste Intermediário.....	40
4.10 A Busca do Ponto de Ajuste Final	40
4.11 Problema de Três Objetivos	42
4.12 Solução do Problema na Fase 1 da Interação 1	42
4.13 Solução do Problema na Fase 2 da Interação 1	43
4.14 Solução do Problema na Fase 1 da Interação 2	43
4.15 Solução do Problema na Fase 2 da Interação 2	44
4.16 Solução de Compromisso do Problema	44
5.1 Grafo do Problema de Expansão com 31 Alternativas.....	53
A2.1 Branch do B&B.....	66
A2.2 Bound do B&B.....	66
A2.3 Busca de Solução em Profundidade.....	67
A2.4 Busca de Solução em Amplitude	67
A3.1 Componente de Ligação do Sistema-Arco-Nó.....	69
A3.2 Grafo	70
A3.3 Matriz de Incidência.....	70

Índice de Tabelas

2.1 Participações das Fontes de Geração	6
2.2 Balanço Hídrico das Bacias Hidrográficas Brasileiras	7
2.3 Potencial Hidrelétrico (estimativa de 1980)	8
2.4 Potencial Hidrelétrico Estimado do Brasil	8
2.5 Potencial de Conservação	12
2.6 Espectativas do PIB Brasileiro.....	12
2.7 Espectativas da Demanda de Energia	13
2.8 Expectativas da Demanda de Energia por Região no Cenário II.....	13
2.9 Fatores de Emissão da Argentina (kg/tEP)	15
2.10 Tecnologias de Controle de Emissão de Poluentes	15
3.1 Histórico do Desenvolvimento das Principais Técnicas da Programação Matemática..	18
3.2 Métodos Iterativos e suas Propriedades	24
3.3 Tabela <i>Pay-Off</i>	28
5.1 Alternativas Seleccionadas	52
6.1 Tabela <i>pay-off</i> de Resultados.....	54
6.2 Soluções Ótimas	55
6.3 Simulação 1.....	56
6.4 Simulação 2.....	57
6.5 Simulação 3.....	57
6.6 Simulação 4.....	58
6.7 Simulação 5.....	58
6.8 Simulação 6.....	59
a3.1 Representação dos Arcos do Grafo	71
a3.2 Correspondência entre os passos do simplex e do GC.....	72

Notações

CONJUNTOS

B	: booleano
N	: natural *
Z	: inteiro
R	: real
R^N	: real de dimensão N
I	: nós
I_e	: nós consumidores (com fluxo entrando)
I_s	: nós geradores (com fluxo saindo)
J	: objetivos
K	: arcos
S	: soluções factíveis
S_X	: soluções extremas factíveis
S_μ	: raios extremos factíveis
S_s	: soluções factíveis suportadas
T	: soluções factíveis inteiras
E	: soluções eficientes
E_X	: soluções extremas eficientes
E_μ	: raios extremos eficientes
W	: soluções fracamente eficientes
Θ	: soluções ótimas
Θ_X	: soluções extremas ótimas
Θ_μ	: raios suportados ótimos
Λ	: pesos

ÍNDICE

(h)	: número da interação
i	: índice das variáveis de decisão
j	: índice dos critérios de decisão
k	: índice dos arcos
l	: índice das variáveis de decisão inteira

CONSTANTES

D	: demanda de energia elétrica
n	: número de objetivo ou dimensão do espaço dos objetivos
t^l	: metas inferiores de cada critério

t^μ	: metas superiores de cada critério
α	: coeficiente da reta de relaxação intermediária
β	: coeficiente de reta de relaxação final

VARIÁVEL ESCALAR

a	: distância do problema minimax
d	: necessidade ou excesso de cada meta
$d^{(h)}$	: distância entre as soluções $x^{(h)}$ com $x^{(h-1)}$
li_i	: limite inferior da i-ésima variável
ls_i	: limite superior da i-ésima variável
$x_j^{(h)}$	: i-ésima solução de decisão do j-ésimo objetivo na h-ésima interação
$z_j^{(h)}$	: i-ésimo critério de decisão do j-ésimo objetivo na h-ésima interação
Δ_j	: valor máximo que o decisor deseja relaxar
δ_+	: variável de excesso da meta
δ_-	: variável de folga da meta
ε	: valor da restrição adicionada aos objetivos
ρ_i	: potencial ou variável dual do nó i

VETOR

b	: recursos ou demandas
c	: custo
c_f	: custo fixo
c_r	: custo relativo
d	: custo total das variáveis inteiras ($d = e \cdot y$)
e	: custo das variáveis inteiras
g	: gradiente da função utilidade
m	: máximo/mínimo valor de cada solução da tabela <i>pay-off</i>
p	: ponto de ajuste final
q	: ponto intermediário de ajuste
r	: ponto de relaxação
w	: custo de penalidade
x	: variável de decisão
x_B	: variável de decisão básica
x_E	: solução eficiente
x_N	: variável de decisão não básica
x_I	: solução ideal
x_r	: solução relaxada
x^*	: solução ótima

$\mathbf{x}^{**}$	: solução de melhor compromisso
$\mathbf{y}$	: variável de decisão inteira
$\mathbf{z}$	: critério de decisão ou custo total
η	: eficiência energética
θ	: ângulo formado pela a reta do objetivo e pelas coordenadas
λ	: peso de cada objetivo
π	: norma adotada pelo método STEM

MATRIZ

$\mathbf{A}$	: de coeficientes
$\mathbf{B}$	: básica
$\mathbf{C}$	: de custos
$\mathbf{D}$	: de coeficientes das variáveis inteiras
$\mathbf{E}$	: de custos das variáveis reais
$\mathbf{I}$	: identidade
$\mathbf{L}$	: triangular inferior
$\mathbf{N}$	: não básica
$\mathbf{U}$	: triangular superior

OPERADORES

$f_n(\mathbf{x})$	: função objetivo
$\mathbf{g}(\mathbf{x})$	: funções de restrições
$\gamma(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)$	: operador de combinação convexa
$\mathcal{G}[\mathbf{I}, \mathbf{K}]$	: grafo formado pelos conjuntos de nós ($\mathbf{I}$) e arcos ($\mathbf{K}$)
$r^{(h)}(\mathbf{x})$	: função de restrição do STEM adicionada na interação h
$U(\mathbf{z})$	: função utilidade, $U: \mathbb{R}^k \rightarrow \mathbb{R}$

Siglas

AR.....	taxa de progresso (<i>archived rate</i>)
B&B.....	algoritmo de <i>Branch and Bound</i>
BCMP.....	programação bi-critérios
CESP.....	Companhia Energética de São Paulo
DESELP.....	Determinação da Expansão do Sistema Elétrico de Longo Prazo
DNAEE.....	Departamento Nacional de Água e Energia Elétrica
ELETROBRAS.....	Centrais Elétricas Brasileira S.A.
ELETRONORTE.....	Centrais Elétricas do Norte do Brasil S.A.
ELETROSUL.....	Centrais Elétricas do Sul do Brasil S.A.
FGD.....	<i>fuel gás dessulfurization</i>
FOB.....	<i>free on board</i>
FU.....	função utilidade
GC.....	grafo conservativo
GCOI.....	Grupo Coordenador para a Operação Interligada
GCPS.....	Grupo Coordenador do Planejamento de Sistemas
GDF.....	método Geoffrion - Dyer - Fainberg
GN.....	gás natural
GP.....	método <i>goal programming</i>
ISWT.....	método <i>Interval Criterion Weights</i>
MONLP.....	programação multi-objetivo não linear
MOILP.....	programação multi-objetivo inteira não linear
MOIP.....	programação multi-objetivo inteira
NIS.....	solução ideal negativa
LNG.....	gás natural liquefeito
PETROBRAS.....	Petróleo Brasileiro Sociedade Anônima
PIM.....	programação inteira mista
PIS.....	solução ideal positiva
PL.....	programação linear
PLMO.....	programação linear multi-objetivo
PMO.....	programação multi-objetivo
PNL.....	programação Não-Linear
PROCEL.....	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
RESVAC.....	óleo de resíduo proveniente da unidade de vácuo de uma destilaria
RHS.....	variáveis ou valores do lado direito das restrições (<i>right hand side</i>)
RIMA.....	relatório de impacto ambiental
STEM.....	STEp Method

STEM-G.....	método STEM-Grafo
TOPSIS.....	método <i>Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution</i>
UHE.....	usina hidrelétrica
UTE.....	usina termelétrica
WASP.....	<i>Wien Automatic System Planning Package</i>
YPFB.....	Yacimientos Petroliferos Fiscales Bolivianos
ZW.....	método de Zionts - Wallenius

Resumo

Este trabalho propõe aplicar uma nova metodologia baseada em otimização com múltiplos critérios na seleção de alternativas para a expansão de um parque gerador de eletricidade.

A metodologia identificar as melhores alternativas de geração considerando critérios econômicos e ambientais. Uma curva de tradeoff é construída a partir das alternativas eficientes para auxiliar a escolha do decisor.

Denominado STEM-Grafo, o método é implementado com três níveis hierárquicos: um código de programação multiobjetivo combina as várias funções objetivos; um algoritmo de branch and bound fixa as variáveis inteiras; um código de otimização em redes resolve o programa linear especializado.

Abstract

This work proposes to apply a new methodology based on optimization with multiple criteria to selection of alternatives for the electricity expansion of a generation park.

The methodology allows to identify the best alternatives for generation, considering economic and environmental criteria. A tradeoff curve is constructed from efficient alternatives to assist the decision-maker choice.

Denominated STEM-Grafo, the method is implemented with three hierarchical levels: multiobjective programming code combines the various objective functions; a branch and bound algorithm fixes the integer variables; a network optimization code solves the specialized linear program.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS

Tradicionalmente, as metodologias para a análise das alternativas de expansão do sistema energético são baseadas em análises dos aspectos técnico-econômicos, fazendo-se, posteriormente, a identificação das consequências ambientais nos relatórios de impactos ambientais (RIMA). A ênfase na minimização dos custos econômicos tem sido muito criticada pelos ambientalistas nas últimas décadas, que enfatizam a necessidade de avaliar os impactos ambientais como as emissões de poluentes e o alagamento de terra, parâmetros difíceis de serem quantificados em termo monetário.

A inclusão dos critérios ambientais no problema de expansão torna improvável a identificação de um conjunto de alternativas ótimas. Pois se um conjunto de alternativas é ótima para um dado critério, pode não ser a mesma para outro critério.

Em razão dos conflitos entre os critérios de seleção, o conceito de solução ótima (x^*) é substituído pelo conceito de solução eficiente (E), ou *ótimo de Pareto*. Quando uma solução eficiente representa o consenso entre os critérios considerados, então ela é denominada de solução de melhor compromisso (x^{**}).

A Programação Multi-Objetivo (PMO) é uma ferramenta matemática que permite a busca da solução eficiente de melhor compromisso, baseando-se nas preferências do decisor.

As principais vantagens da PMO são:

- “otimização” de problemas com vários objetivos;
- obtenção da solução de melhor compromisso;
- quantificação dos conflitos existentes entre os objetivos.

Os métodos de PMO são divididos em:

- métodos com preferência definida;
- métodos com articulação das preferências;

- métodos sem preferência definida.

Também conhecidos como métodos interativos, os métodos com articulação de preferências têm encontrado maior aceitação, pois eles consideram que o decisor tenha em mente as suas preferências, mas não consegue explicitá-las de forma matemática. Neste caso, esses métodos interagem com o decisor (através de perguntas e respostas), na busca de novas informações que os permita articular as preferências do decisor.

O objeto de estudo será o planejamento da expansão da geração do Sistema Interligado Sul-Sudeste. Como critérios de seleção, serão considerados: o custo econômico-financeiro, a conservação de energia, o nível de emissão de poluentes e a área da terra alagada; os dois últimos são critérios ambientais que procuram minimizar as alternativas das termelétricas e hidrelétricas, respectivamente.

Serão consideradas as alternativas com potencial para a geração de energia elétrica para o atendimento da região, tais como:

- pequenas UHE's da própria Região, utilizando os recursos hídricos remanecentes;
- grandes UHE's da Região Amazônica;
- parque de geração térmica na própria Região, a partir de diversos combustíveis;
- cogeração com bagaço de cana;
- e conservação de energia.

1.2 - ENVOLVIMENTO DAS IDÉIAS

Em face da reduzida presença de recursos hídricos ainda não aproveitados da Região Sudeste, teve-se a idéia inicial de utilizar as técnicas de otimização matemática para confrontar o aproveitamento dos recursos hídrico residuais da região sudeste com a possibilidade do aproveitamento do gás natural para geração de energia elétrica, visando a possibilidade da importação do gás natural boliviano e argentino.

Com o crescimento das preocupações ambientais nas últimas décadas, impôs-se a necessidade de considerar também os aspectos ambientais na análise, semelhante ao trabalho de Amagai (1990), que aplicou a programação multi-objetivo na análise do setor elétrico japonês.

O fato de estarem interligados os sistemas elétricos das Regiões Sul e Sudeste fez perceber a necessidade de considerar também a Região Sul.

Além disso, considerou-se também outras fontes com potencial de geração de energia elétrica para as regiões Sul-Sudeste, tais como: as UHE's previstas para as regiões

consideradas (para aproveitar o potencial hidrico remanescente) e da Bacia Amazônica e do Rio Tocantins (considerando a possibilidade da geração de energia para as regiões); um parque de geração térmica composto por vários combustíveis como: óleo combustível, gás natural, carvão; conservação de energia e cogeração.

Com relação a ferramenta utilizada na análise do problema, utilizou-se o método STEM e o algoritmo de grafo conservativo (GC), a qual foi denominada de STEM-Grafo (STEM-G).

O Método STEM-G é constituído por uma estrutura de três níveis hierárquico, onde no nível mais alto , localiza-se o STEM-G propriamente dito, que interage com o decisor a cada nova solução encontrada, e redireciona a busca para uma nova solução caso o decisor não esteja satisfeito com a solução encontrada.

CAPÍTULO 2

PLANEJAMENTO DE EXPANSÃO DO SETOR ENERGÉTICO

2.1 - INTRODUÇÃO

Para atender a demanda do mercado consumidor, o planejamento da expansão da geração de energia elétrica seleciona diversas alternativas dentro de um conjunto de alternativas candidatas. Usualmente o critério adotado na seleção é o de custo mínimo, sendo que os impactos ambientais são analisados exogenamente.

No estudo de caso do capítulo 5, consideram-se quatro tipos de alternativas: as hidrelétricas, as termelétricas, a cogeração e os programas de conservação de energia^{2.1}. Na seção 2.3, as alternativas de geração serão descritos com mais detalhe.

Além disso, o estudo de caso também considera quatro tipos de critérios de seleção (objetivos): área alagada, custo econômico, emissão de poluentes e energia conservada, os quais apresentam custos fixos e variáveis. A seção 2.5 traz comentários mais detalhados desses critérios de seleção.

2.2 - PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO DO SETOR ELÉTRICO

O planejamento da expansão do setor elétrico brasileiro é coordenado pela ELETROBRÁS e segundo Fortunato *et alli*. (1990), conta com a participação das empresas do setor através de órgãos colegiados, tais como o GCPS, GCOI e de diversos outros agentes direta ou indiretamente relacionados com o suprimento e a utilização da energia elétrica, segundo. O planejamento da expansão é dividido em três tipos de estudos: longo, médio e curto prazo.

O estudo de longo prazo procura estabelecer as linhas mestras da geração e transmissão de energia, os custos marginais de referência, um programa de desenvolvimento tecnológico e industrial baseadotanto na evolução do mercado como nas fontes primárias e na evolução

^{2.1} a consideração da conservação de energia como alternativa de geração é devido a substituição da construção de uma nova unidade de geração pela conservação.

tecnológica. O estudo de longo prazo tem um horizonte de 30 anos, discretizado quinenalmente e feito a cada 5 anos.

O estudo de médio prazo procura estabelecer os programas de referência de geração e transmissão a custo mínimo; os recursos necessários para investimentos e demanda de serviço na construção baseados nas previsões econômicas e energéticas a médio prazo, à viabilidade ambiental e a continuidade adequada do potencial hidrelétrico. O estudo de médio prazo tem um horizonte de 15 anos, discretizado mensalmente e feito a cada 2 anos.

O estudo de curto prazo procura fazer ajustes no programa de expansão de referência, na programação financeira do setor e nos estudos de projeto básico de usinas, que são elementos baseados tanto nos requisitos de mercado, como no prazo de implantação do empreendimento e na capacidade financeira do setor. O estudo de curto prazo tem um horizonte de 10 anos, discretizado mensalmente e feito a cada ano.

O setor elétrico brasileiro desenvolveu um modelo de otimização chamado DESELP (Determinação da Expansão do Sistema Elétrico de Longo Prazo), para estudos de longo prazo. O modelo procura determinar a composição ótima do futuro parque gerador a custo mínimo, de acordo com as seguintes restrições, segundo Pinheiro & Trinkenreich (1980):

- atendimento aos requisitos de energia e de ponta em períodos críticos;
- capacidade máxima de intercâmbio (por ex. : Região Sul-Sudeste);
- despacho de potência a 2 patamares (ponta e fora de ponta).

A análise do modelo é feita ao nível de subsistema ou regiões elétrica, tanto para a geração como para a transmissão. O horizonte é dividido em estágios temporais, no caso do estudo de longo prazo, o horizonte de 30 anos divididos em 6 períodos de 5 anos.

2.3 - ALTERNATIVAS DE GERAÇÃO

O sistema brasileiro de geração de energia elétrica é constituído predominantemente por usinas de geração hidrelétrica. De acordo com o Balanço Energético Nacional de 1995, em 1994 o Brasil teve 93,88% (dada na tabela 2.1) da sua energia gerada proveniente das hidrelétricas.

Tabela 2.1 - Participações das Fontes de Geração

Fontes	Energia Elétrica Gerada (milhares de tEP)	Participação (%)
Energia Hidráulica	70.446	93,88
Carvão Vapor	1.082	1,44
Gás Natural	139	0,19
Lenha	176	0,23
Produtos de Cana	469	0,63
Outras Fontes Primárias	860	1,15
TOTAL das Fontes Primárias	73.172	97,52
Diesel	634	0,85
Óleo Combustível	836	1,12
Outras Fontes Secundárias	376	0,51
TOTAL das Fontes Secundárias	1.864	2,48
TOTAL GERAL	75.036	100,00

Fontes :BEN, 1995

As projeções da ELETROBRÁS têm indicado uma possibilidade de aumento da participação do gás natural e do bagaço de cana na matriz energética, devido principalmente às possibilidades da importação do gás natural da Bolívia e da Argentina, e do aumento da compra da energia elétrica excedente dos autoprodutores pelas concessionárias.

2.3.1 - Alternativas Hídricas

Em 1984, o DNAEE dividiu o sistema hídrico brasileiro em oito bacias principais, que são apresentada esquematicamente pela figura 2.1.

A disponibilidade hídrica brasileira corresponde a mais de 17% da disponibilidade mundial e a 75% da América do Sul. Pela tabela 2.2, a bacia Amazônica capta mais de 80% da disponibilidade hídrica do país, sendo que o restante é distribuído entre as outras bacias, com uma variação de 5% a 0,2%.

Historicamente, o Brasil tem um período crítico de vazão de 4 a 5 anos, com uma periodicidade em torno de 50 anos, sendo que o último ocorreu em 1952/1956.



Figura 2.1 - Bacias Hidrográficas Brasileiras
Fonte: Barth et alli, 1987

Tabela 2.2 - Balanço Hídrico das Bacias Hidrográficas Brasileiras

Região	Área (km ²)	Chuva Média (m ³ / s)	Vazão Média (m ³ / s)	Evapora- transpiração (m ³ / s)	Vazão Chuva (%)
1. Amazonas	6.112.000	493.491	202.000	291.491	41
2. Tocantins	757.000	42.387	11.300	31.087	27
3. Atlântico N-NE	1.029.000	44.369	9.130	35.239	21
4. São Francisco	634.000	19.829	3.040	16.789	15
5a. Atlântico leste(1)	242.000	7.784	670	7.114	9
5b. Atlântico leste(2)	303.000	11.791	3.710	8.081	31
6a. Paraná	877.000	39.935	11.200	28.735	28
6b. Paraguai	368.000	16.326	1.340	14.986	8
7. Uruguai	178.000	9.589	4.040	5.549	42
8. Atlântico Sul	224.000	10.519	4.570	5.949	43
BRASIL - TOTAL	10.724.000^{2.2}	696.020	251.000	445.020	36

Fonte : Barth et alli, 1987

^{2.2} Área das Bacias Hidrográficas.

Tabela 2.3 - Potencial Hidrelétrico (estimativa de 1980)

Bacias Hidrográficas	Potencial Hidrelétrico (energia firme em MW/ano)			
	Total	Inventariado	Estimado	
			Individualizado (conhecido)	Remanescente (desconhecido)
Amazonas	36.163	12.143	19.481	4.539
Tocantins	12.660	10.768	1.295	597
Atlântico Norte	485	10	350	125
Atlântico Nordeste	442	217	219	6
São Francisco	9.150	7.647	942	581
Atlântico Leste	6.656	4.555	1.430	671
Paraná	28.030	23.757	2.921	2.352
Atlântico Sudeste	4.708	1.465	2.207	1.036
Uruguai	7.278	5.908	1.219	149
BRASIL	106.570	66.470	30.064	10.036

Fonte : Barth et alli, 1987

A disponibilidade hídrica é estimada em 129 GW médio, ver a tabela 2.4. Considerando as participações do potencial hidrelétrico das regiões hidrográficas da tabela 2.3 sejam mantidas, então a Bacia Amazônica teria um potencial estimado em torno de 44 GW médio.

Tabela 2.4 - Potencial Hidrelétrico Estimado do Brasil (MW)

Anos	Inventariado	Estimado	Total
1970 / 79	36.977	42.370	79.347
1980 / 85	66.470	40.100	106.570
1986 / 90	75.766	51.777	127.543
1991 / 94	77.200	51.800	129.000

Fonte : ELETROBRÁS, 1995

2.3.2 - Alternativas Termelétricas

O sistema termelétrico brasileiro é baseado em carvão, óleo combustível, gás natural e vários tipos de resíduos de processos industriais, tais como alcatrão e outros.

As termelétricas a carvão, localizadas na Região Sul (Rio Grande do Sul e Santa Catarina), caracterizam-se pela elevada taxa de emissão de poluentes, devido à baixa qualidade do carvão brasileiro.

Apesar da pequena participação do gás natural na geração de energia elétrica, a importação do gás natural boliviano e argentino permitirá o aumento da sua oferta e, conseqüentemente, do seu aproveitamento na geração de energia elétrica. A própria PETROBRAS prevê uma participação de 10% na matriz energética no ano 2000 e 12% para o ano de 2010. No dia 17 de fevereiro de 1993, a PETROBRAS assinou um acordo com a YPFB (Yacimientos Petrolíferos Fiscales Bolivianos) que prevê a compra do gás natural boliviano.

Na figura 2.2 é apresentado o traçado do futuro gasoduto de Santa Cruz de La Sierra até São Paulo (1.956 km) e a possível extensão até o Porto Alegre (1.105 km).



Figura 2.2: Gasoduto Santa Cruz de La Sierra-São Paulo-Porto Alegre
Fonte: PETROBRÁS

O consórcio encabeçado pela PETROBRÁS estima que serão gastos US\$ 3,2 bilhões no projeto do gasoduto. Entre os participantes do consórcio, estão: Austrália's Broken Hill Properties, British Gas, Tenneco Gas (EUA) e Enron (EUA). Quanto aos preços, é esperado um preço de US\$ 0,90 por milhão de BTU no FOB e US\$ 2,70 por milhão de BTU no *city gate* da cidade de São Paulo. Por outro lado, segundo (Gomes, 1994), a COMGAS, que será a distribuidora do gás, contesta a competitividade do gás natural por este preço no *city gate*, pois com este preço a COMGAS só conseguirá vender até 2,8 milhões de m³/dia e a um preço final de US\$ 3,55 por milhão de BTU.

Comparando as possibilidades de geração a partir do gás natural, as termelétricas a óleo combustível tem um combustível de menor custo (para o óleo 1A o preço é US\$ 2,82 por milhão de BTU) e uma disponibilidade maior (existem 6 refinarias na região sudeste).

2.3.3 - Outras Alternativas de Geração

A utilização da cogeração por parte dos autoprodutores no Brasil concentra-se nos setores de papel e celulose e sucro-alcooleiro, onde os combustíveis usados são: licor negro e bagaço de cana, respectivamente. Em menor escala, é usada nos setores de alimentos e bebidas, química, têxtil, etc.

Segundo Walter (1994), a cogeração pode trazer diversas vantagens para o setor elétrico, para segmentos industriais e para a sociedade em geral.

As principais vantagens para o setor elétrico são:

- redução dos custos marginais de expansão de longo e curto prazo;
- postergação de investimentos de expansão do parque gerador;
- aumento da capacidade de reserva;
- redução do risco de déficit;
- e aumento da oferta local.

Para o setor industrial:

- possibilidade de diversificação da produção;
- minimização da dependência do fornecimento de energia elétrica das concessionárias, principalmente para as indústrias eletro-intensivas;
- e a possibilidade de redução dos custos de produção do álcool.

E para a sociedade:

- dinamização do setor de bens de capitais;
- aumento da demanda de serviços especializados;
- aumento da arrecadação de impostos, principalmente a nível local;
- aumento e/ou estabilização da oferta de empregos na área rural;
- baixos impactos ambientais associados à produção de eletricidade.

O setor de papel e celulose não chega a produzir grande quantidade de excedente de energia, enquanto o setor sucro-alcooleiro apresenta excedente durante a safra e falta na entressafra, pois o setor faz a queima do bagaço de cana. Pelos cálculos de Walter (1994), somente o estado de São Paulo, com uma participação de 65% das usinas brasileiras, terá um potencial de geração de 3660 MW médios com a tecnologia BIG-STIG no estado de São Paulo em 2014.

Houve negociações entre o setor elétrico e o sucro-alcooleiro para comercialização desse excedente de geração, é o caso do Programa de Cogeração e Produção Particular de Energia Elétrica no Setor Sucro-alcooleiro do Estado de São Paulo, assinado em 1993. Por outro lado, as negociações têm encontrado bastante dificuldade devido ao baixo custo

marginal de expansão da geração de longo prazo de US\$ 34 por MWh, segundo Walter (1994), o setor sucro-alcooleiro necessita de US\$ 45 a US\$ 60 por MWh para viabilizar o seu investimento.

Além da queima é possível também gaseificar o bagaço pela forma biológica ou térmica. A conversão por meios biológicos converte a biomassa em metano e etanol, enquanto a conversão por meios térmicos produz gás sintetizado H_2 e CO , passíveis de serem convertidos em metano e etanol.

Além da cogeração, a conservação de energia representa uma outra alternativa nesse sentido. Mesmo não sendo uma geração propriamente dita, o simples ato de conservar torna possível postergar a construção de novas unidades de geração de energia.

Conservar energia significa promover o uso eficiente de energia através da criação de mecanismos (técnico, econômico, político, educacional ...) para aumentar a eficiência energética dos diversos processos de produção e consumo e/ou minimizar os desperdícios.

As principais vantagens da conservação são:

- uso racional da energia;
- postergação de investimento em novas unidades de geração;

Em geral, o aumento da uso racional requer menor custo monetário, mas necessita de maior conscientização dos usuários, tais como, desligar equipamento quando não estiver em uso. Já o aumento da eficiência, em geral significa um investimento de capital, como a troca de equipamentos por outros mais eficientes, por exemplo: a troca de motores e lâmpadas, ou ainda, a instalação de sistema de controle do consumo de energia como nos edifícios inteligentes.

Em dezembro de 1985, o governo federal criou o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL) sob a coordenação da ELETROBRÁS. O PROCEL tem atuado em áreas como:

- incentivo à participação dos usuários na conservação;
- criação de padrões de eficiência mínima para equipamentos de consumo;
- incentivo financeiro aos programas de conservação de energia.

Tabela 2.5 - Potencial de Conservação

Cenários	2000	2005	2010	2015
I	9,1	21,1	42,8	63,9
II	14,7	31,1	50,9	75,8
III	17,8	44,2	70,8	105,3
IV	20,0	49,5	81,6	92,2

Fonte : ELETROBRÁS (1994)

Segundo a ELETROBRÁS, o potencial de conservação de energia no Brasil é de 75,8 MWh para o cenário 2, em 2015, ver a tabela 2.5.

Segundo a Gazeta Mercantil (1995), há uma verba de US\$ 50 milhões em processo de aprovação para o PROCEL com o objetivo de conservar 600 GWh.

2.4 - MERCADO CONSUMIDOR

O consumo de energia elétrica no Brasil é atualmente de 200,8 TWh, sendo que 75% do consumo pertence às Regiões Sul e Sudeste. Na última década (80/90), o consumo de energia elétrica nas Regiões Sul e Sudeste apresentaram um crescimento médio de 4,84 % a.a.

Em sua análise, a ELETROBRÁS considera quatro cenários, nos quais os crescimentos do PIB brasileiro são projetados com variações de 3,3% a 5,8% a.a. (veja a tabela 2.6).

Tabela 2.6 - Expectativas do PIB brasileiro (US\$ bilhões)

Cenários	1990	1995	2000	2005	2010	2015
I	320	364,4	382,5	488,2	593,9	722,6
II	320	353,3	450,9	575,5	700,2	851,9
III	320	385,6	516,0	690,6	881,3	1.124,8
IV	320	385,6	540,8	723,7	968,5	1.196,1

Fonte : ELETROBRÁS, 1994

Com base nas características de consumo nos anos recentes e no crescimento do PIB, excluindo as possíveis participações dos autoprodutores e as possibilidades de conservação de energia, obteve-se a expectativa de demanda de energia elétrica dada na tabela 2.7, segundo a ELETROBRÁS (1994).

Tabela 2.7 - Expectativas da Demanda de Energia no Brasil (TWh)

Cenários	1990	1995	2000	2005	2010	2015
I	210,3	246,2	293,8	384,0	467,2	563,0
II	210,3	250,9	329,5	430,6	523,9	631,3
III	210,3	273,7	360,7	473,2	589,7	731,4
IV	210,3	273,7	377,6	495,4	642,6	826,4

Fonte : ELETROBRÁS, 1994

Para o cenário II, a distribuição geográfica do consumo de energia elétrica é dado na tabela 2.8, que reflete a um crescimento de 48,4% e 15,8% a.a. para as Regiões Sul e Sudeste, respectivamente.

Tabela 2.8 - Expectativas da Demanda de Energia por Região no Cenário II (TWh)

	1990	1995	2000	2005	2010	2015
Norte	9,3	13,5	20,1	29,7	40,3	52,0
Nordeste	32,8	43,4	59,6	81,8	104,8	133,8
Sudeste	129,7	145,8	184,2	231,2	267,2	305,5
Sul	29,7	36,4	48,4	63,7	80,2	99,7
C. Oeste	8,8	11,8	17,1	24,1	31,4	39,1
Brasil	210,3	250,9	329,5	430,6	523,9	631,3

Fonte : ELETROBRÁS, 1994.

2.5 - CONDICIONANTES AMBIENTAIS DA EXPANSÃO DO SISTEMA HIDROTÉRMICO

O crescimento das preocupações ambientais verificado nas últimas décadas, implicou a necessidade de enfatizar também os aspectos ambientais no planejamento energético brasileiro, analisado exogenamente no Relatório de Impacto Ambiental (RIMA).

Consideram-se quatro critérios da seleção:

- minimização do alagamento de terra;
- minimização do custo econômico-financeiro;
- minimização da emissão de poluentes;
- e maximização da conservação de energia .

O primeiro e o terceiro representam a seleção das alternativas baseados nos recursos ambientais das UHE's e UTE's. A maximização da conservação de energia representa a eficiência de transformação de outras formas de energia em energia elétrica e a minimização dos custos representa a manutenção e viabilização econômica do setor elétrico.

2.5.1 - Emissão de Poluentes

As emissões de poluentes são proveniente da queima dos combustíveis fósseis^{2,3}. Os principais poluentes são: SO₂, NO_x, CO₂ e particulados. Em menor escala tem-se CO, cloretos, fluoretos e outros.

A emissão do SO₂ apresenta um impacto ambiental regional e local, causando danos à saúde, à agricultura e às vegetações, devido à chuva ácida. Os principais combustíveis que emitem dióxido de enxofre são óleo combustível e carvão. Existem diversas tecnologias que podem amenizar este impacto ambiental. O uso dos dessulfurizadores, extração de enxofre em combustível gasoso ou FGD (*fuel gas dessulfurization*) são algumas possíveis formas de executar esta tarefa, eles conseguem atingir uma eficiência de 99,9% e 70% a 95%, respectivamente (OCDE, 1985).

O efeito principal do impacto ambiental do CO₂ é a sua participação na formação do efeito estufa. No entanto é uma das matérias-primas para a realização da fotossíntese. A única forma de amenizar este impacto é a minimização da queima de combustíveis fósseis.

O óxido de nitrogênio causa problemas de saúde em escala local e regional. Sua formação deve-se principalmente à alta temperatura da queima do combustível. Existem algumas formas de amenizar sua produção, tais como: combustão em dois estágios, pouco excesso de ar na queima do combustível, denitrificação do gás natural e outros. Essas tecnologias de controle possuem uma eficiência que varia de 60% a 80% (OCDE, 1985).

A emissão de particulados e de cinzas ocorre principalmente nas UTE a carvão, eles podem causar alergia, danos ao sistema respiratório, à vegetação, etc. O uso de precipitador eletrostático (99,9% de eficiência), ciclones (bastante eficientes para partículas menores), etc. são algumas formas de amenizar este impacto ambiental (OCDE, 1985).

A título de ilustração, os fatores de emissão na Argentina são apresentados na tabela 2.9. É necessário lembrar que os combustíveis utilizados lá têm uma qualidade melhor se comparado com aqueles utilizados no Brasil, principalmente no caso do carvão.

^{2,3} salvo algumas exceções como enchimento do reservatório de uma hidrelétrica, onde ocorre a emissão de metano devido ao decomposição de vegetais.

Tabela 2.9 - Fatores de Emissão da Argentina (kg/tEP)

Combustíveis Poluentes	Carvão	Óleo Combustível	Óleo Diesel	Gás Natural
Particulados	120,97	2,90	0,64	0,05
SO ₂	62,90	38,30	17,84	0,01
NO _x	19,94	8,07	8,64	9,46
CO ₂	3836,00	3050,00	2969,00	2121,00

Fonte: Carnevalli & Suárez, 1993

Na tabela 2.10 estão resumidas as principais formas de controlar a emissão de poluentes.

Tabela 2.10 - Tecnologias de Controle de Emissão de Poluentes

POLUENTES	TECNOLOGIAS DE CONTROLE
Óxido de Enxofre	- dessulfurizadores - retirada do enxofre do combustível
Óxido de nitrogênio	- baixo excesso de ar na queima - combustão em dois estágios - denitrificação do combustível
Hidrocarbonetos	- melhor manutenção dos equipamentos - caldeira de CO
Particulados	- precipitador eletrostáticos - ciclones
Monóxido de carbono	- caldeira de CO

Fonte : OECD, 1985

2.5.2 - Área Alagada

Para que as barragens das UHE's possam armazenar água para geração de energia elétrica durante o período seco é necessário alagar uma certa área para a formação do reservatório.

As barragens possibilitam controle de cheias, irrigação, aumento da navegabilidade do rio e turismo; por outro lado alagam áreas que podem ser agricultáveis, propícias a mineração, paisagens naturais ou até uma cidade, causam mudanças nas paisagens naturais e no ecossistema do rio e suas vizinhanças, dificultam a migração dos peixes durante a piracema, emitem o gás metano na decomposição da vegetação submersa durante o período de implantação do reservatório. Além do risco de desabamento das barragens^{2.4} que deve ser devidamente equacionado durante o seu projeto.

^{2.4} o desabamento do reservatório Variont, na Itália causou a morte de 2000 pessoas (OCDE.1985).

Os cálculos da área alagada e do volume do reservatório são feitos durante a fase de estudo de inventário da usina. Em geral, utiliza-se a técnica de aerofotogrametria na definição das curvas de níveis^{2.5} de cada cota^{2.6} do reservatório e conseqüentemente a área do espelho d'água. Com os valores integralizados do volume (cubagem), é feita uma regressão polinomial de quarto grau para relacioná-lo com a cota.

2.5.3 - Conservação de Energia

Pelo lado da oferta, a conservação de energia ocorre basicamente na eficiência da conversão de outras energias em energia elétrica. A eficiência de conversão em energia elétrica a partir das UHE's variam em torno de 85% a 90%, quando maior for as hidrelétricas maior será a sua eficiência. Nas termelétricas, já se têm notícia da existência de termelétricas com eficiência de até 45%. Na cogeração, quando se considerada a utilização do vapor nos processos industriais a eficiência chega a alcançar até 80%.

Pelo lado da demanda, a conservação ocorre principalmente na eficiência dos usos finais e nos programas de conservação de energia elétrica que procuram incentivar o uso racional dos consumidores. No estudo de caso, a conservação pelo lado da demanda foi considerada como uma das alternativas de geração.

2.6 - O PLANEJAMENTO DE EXPANSÃO DO SETOR ELÉTRICO APRESENTADO NUMA ESTRUTURA DE GRAFO

Com os quatro tipos de alternativas de geração apresentados na seção 2.3 (termelétricas, hidrelétricas, cogeração e programas de conservação de energia), o problema da expansão do parque de geração pode ser representada pelo grafo da figura 2.3; onde as alternativas tracejadas são alternativas candidatas que poderão ser construídas durante o horizonte considerado e as não tracejadas são as alternativas já existente.

^{2.5} na construção da UHE de Tucuruí utilizou-se a técnica de aerofotogrametria, a qual fez-se levantamento de perfis de lâmina a uma escala 1:25.000 e curvas de níveis de 10 em 10 metros (Eletronorte, 1988).

^{2.6} a UHE de Tucuruí com uma cota de 72 m. apresenta um espelho d'água com uma área de 2.430 km² e um volume de 45,5 km³ (Eletronorte, 1988).

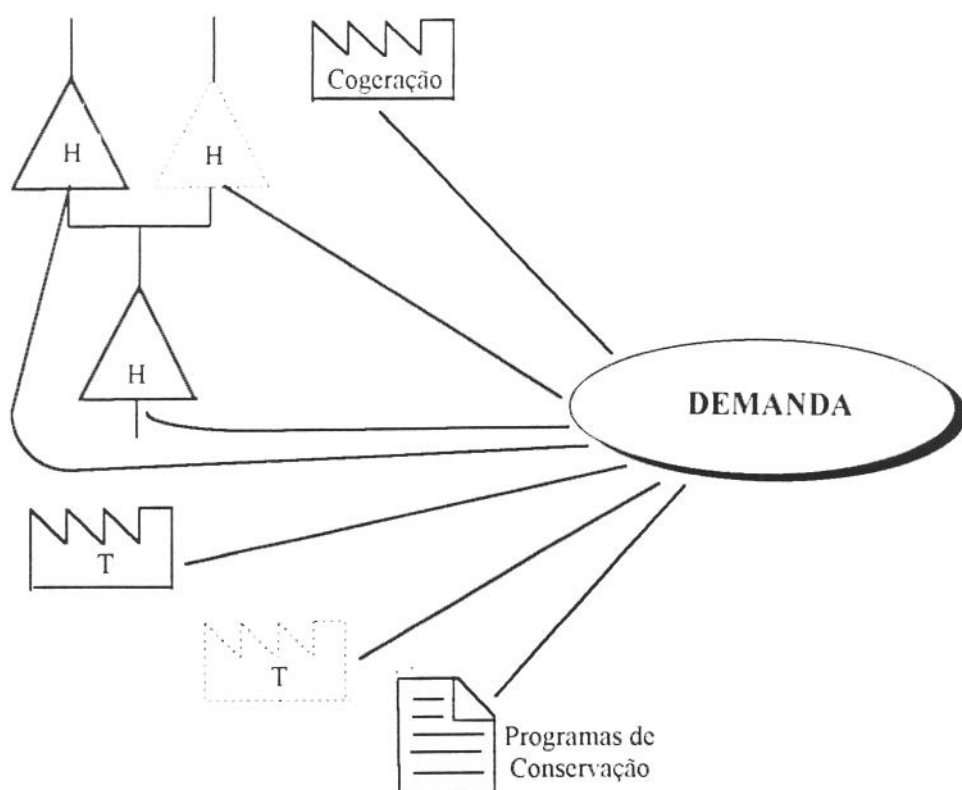


Figura 2.3 - Opções de Expansão da Oferta de Energia

O problema de otimização da expansão será formulado matematicamente no capítulo 5, usando as metodologias de PMO discutidas nos capítulos 3 e 4.

CAPÍTULO 3

METODOLOGIAS DE OTIMIZAÇÃO BASEADAS EM VÁRIOS OBJETIVOS

3.1 - INTRODUÇÃO

Durante a segunda guerra mundial, foram criados diversos grupos acadêmicos, com o objetivo de estudar o melhor uso possível dos escassos recursos então disponíveis. O êxito alcançado por esses grupos deu origem a um novo ramo da pesquisa, a Pesquisa Operacional (PO) e incentivou o desenvolvimento de novas ferramentas para a PO, tais como, a programação linear (PL), a programação dinâmica, a programação não-linear e as simulações, como pode ser visto na tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Histórico do Desenvolvimento das Principais Técnicas da Programação Matemática

Ano	Técnica Matemática	Autor Principal
1947	Programação Linear (SIMPLEX)	Dantzig
1950	Programação Dinâmica	Bellman
1951	Programação Não-Linear	Kuhn - Tucker
1955	Programação Quadrática	Wolfe
1958	Programação Linear Inteira	Gomory
1960	Programação Linear Mista	

Apesar da disponibilidade destas ferramentas, os problemas de alocação dos recursos continuaram, pois alguns problemas reais, tais como: demanda de energia e/ou água, poluição ambiental, produtividade, recursos naturais e outros, necessitavam de um tratamento multidisciplinar na análise da tomada de decisão, ou seja, uma solução baseada em mais de um critério de decisão.

A Programação Multi-Objetivo (PMO) é uma técnica quantitativa que permite analisar os problemas de alocação de recursos à luz de vários critérios de decisões. Onde cada objetivo

do PMO representa um critério de decisão, que pode ser econômico, técnico, ambiental, social, administrativo, etc.

A análise concomitante de vários objetivos permite avaliar os conflitos existente entre eles. Neste caso, o conceito de solução ótima é substituído pelo conceito de solução eficiente (não dominada, ótimo de Pareto), pois a solução ótima de um determinado objetivo pode não ser ótima para outros objetivos.

A formulação geral do PMO é:

$$\begin{aligned} \min \quad & z_1 = \{f_1(x)\} \\ \min \quad & z_2 = \{f_2(x)\} \\ & \vdots \\ \min \quad & z_n = \{f_n(x)\} \\ \text{s.a} \quad & g(x) \leq 0 \\ & x \in S \end{aligned} \tag{3.1}$$

No caso particular das funções objetivos e das restrições lineares, o problema pode ser representado pela seguinte formulação:

$$\begin{aligned} \min \quad & z = Cx \\ \text{s.a} \quad & Ax = b \\ & x \geq 0 \end{aligned} \tag{3.2}$$

Em geral, os métodos de resolução da PMO são classificados como:

- métodos com preferência definida;
- métodos sem preferência definida;
- métodos com articulação das preferências.

A figura 3.1 mostra outra forma de classificar os métodos de resolução do PMO, segundo Psarras *et alli.* (1990).

	Interativo	Não Interativo
Ponto Ideal	STEP/STEM GPSTEM POP	<i>Goal Programming</i>
Função Utilidade	ZW GDF ISWT	Pesos

Figura 3.1 -- Classificação Alternativa dos Métodos de PMO
 Fonte: Psarras, 1990

3.2 - ASPECTOS HISTÓRICOS

Embora o desenvolvimento da PMO só tenha vindo a ocorrer nas últimas décadas, a ideia da solução eficiente foi citada pela primeira vez por Pareto em 1896. De certa forma as etapas do desenvolvimento da PMO podem ser divididas em décadas:

- década 50 - desenvolvimento teórico-matemático;
- década 60 - desenvolvimento metodológico;
- década 70 - desenvolvimento de métodos iterativos;
- década 80 - grandes aplicações;
- década 90 - aplicações generalizadas.

Segundo Romeno & Rehman (1989), a origem do PMO veio com as publicações dos trabalhos de Koopmans (1951) e de Kuhn & Tucker (1951), onde o primeiro formulou o conceito da eficiência e o segundo desenvolveu a sua condição de existência da teoria.

Na década de 60 surgiram diversos métodos de resolução de PMO, Zadeh (1963) foi o primeiro a sugerir o método dos pesos, Ijiri (1965) utilizou o *Goal Programming* (GP) com pesos hierarquisado (definidos), Marglin (1967) propôs o método das ϵ -restrições e Geoffrion (1968) estabeleceu um conceito próprio de solução eficiente.

Nos anos 70, Benayoun *et alli.* (1971) desenvolveram o método STEM (*STEP method*), Geoffrion *et alli* (1972) desenvolveram o método GDF (Geoffrion-Dyer-Feinberg), utilizando o algoritmo de Frank-Wolfe, Zionts & Wallenius (1976) desenvolveram o método ZW (Zionts-Wallenius) o qual foi aperfeiçoado por Zionts & Wallenius (1983), Steuer (1977) apresentou o método *Interval Criterion Weights* e Chankong (1978) apresentou o método ISWT (*Interactive Surrogate Worth Trade-Off*); além de outros métodos que mais tarde apareceram.

Em 1972, iniciam-se as aplicações do PMO iterativo nos problemas reais com Geoffrion *et alli.* (1972) usando o método GDF no planeamento académico. Partindo deste exemplo, outras aplicações foram implementadas, como: simulação da otimização (GDF), política microeconomia (ZW), gerenciamento florestal (*Interval Criterion Weights*), planeamento de suprimento d'água (STEM), sistema ambiental (ISWT), etc.

Nas aplicações específicas para a expansão da geração de energia pode-se citar o modelo SELPE que foi desenvolvido por Kok (1987) para a Holanda. O modelo tinha três objetivos: econômico, ambiental e estratégico, resultando em um total de nove objetivos.

Outro trabalho concebido para o setor elétrico é o de Amagai & Leung (1990) que foi aplicada ao setor elétrico japonês, os autores utilizaram basicamente o método dos pesos a fim de gerar o gráfico *Trade-Off* com as soluções eficientes geradas pelo método. Quanto ao problema de expansão, foram definidos dois objetivos: custo monetário e emissão de poluentes na análise de seis tipos de geração: nuclear, óleo combustível, carvão, LNG, hidrelétricas

comuns e reversíveis. Outros três trabalhos semelhantes foram feitos por: Chan & Correia (1994) - que trabalhou com três objetivos para este mesmo estudo de caso; o de Tzeng *et alli.* (1994) - que, no estudo do setor elétrico de Taiwan, considerou três objetivos: o econômico, o estratégico e o ambiental; e o de Ennes *et alli.* (1993) - que, tendo trabalhado igualmente com três objetivos, utilizou o método do ϵ -restrição.

Ainda em de 1994, Balestieri (1994) aplica o método GDF na expansão de uma unidade de processamento de celulose para geração de energia elétrica para cogeração.

O trabalho mais recente encontrado nesta área deve-se a Ramanathan & Ganesh (1995) para o setor elétrico residencial indiano, o qual considerou 12 objetivos, entre eles a minimização do custo do ciclo de vida e maximização da eficiência do sistema e da segurança.

Entre os pacotes comerciais destacam-se o WASP (*Wien Automatic System Planning Package*), utilizado pela ENEL da Itália e pelos planejamentos de expansão da Bolívia (ENDE, 1990) e da Coreia (Kim & Ahn, 1993) e o DESELP formulado pela Eletrobrás para o planejamento da expansão a longo prazo do país. Outros pacotes como ELECTRE e PROMETHEE, cujos detalhes podem ser obtidas no Chankong & Haimes (1983), Goicoechea *et alli.* (1982) e Huylenbroeck (1995).

3.3 - CONCEITOS GERAIS

Função Utilidade: a função utilidade (FU) representa a formalização das preferências do decisor sobre os critérios de seleção adotados no modelo de programação multi-objetivo. Considerando FU ($U(z)$), o PMO pode ser representado por um único objetivo com a seguinte formulação:

$$\text{Max } \{ U(z) : z = f(x), x \in S \} \quad (3.3)$$

Em geral, existe uma grande dificuldade na obtenção da FU, pois considera-se que ela existe na mente do decisor, mas ele não consegue explicitá-la formalmente.

Neste caso, alguns métodos utilizam algoritmos para auxiliar a explicitação dessas preferências, como o método GDF. Enquanto outros métodos apresentam uma relação de soluções, como o método dos pesos.

Otimidade: nos problemas de PL, a solução ótima representa a melhor solução, pois existe somente um único critério de decisão.

$$\theta = \{ x^* \in R^N \mid \min z = Cx^* \text{ e } x^* \in S \} \quad (3.4)$$

Nos casos de vários critérios, o conceito de otimalidade não é aplicado, sendo utilizados os conceitos de dominância, eficiência, solução ideal e melhor compromisso.

Solução Ideal: o conceito de solução ideal é proveniente de alguns métodos de resolução dos modelos de PMO. Se, por um lado, a solução ideal representa a solução ótima para todos os objetivos, por outro, ela é normalmente utópica, exceto nos casos em que os critérios de seleção convergem para a mesma solução.

A solução ideal é obtida através da otimização individual de cada objetivo, onde cada elemento x_i da solução ideal (z_i) é a solução s_i obtida dos PL_i . A representação matemática da solução ideal no caso da minimização é a seguinte:

$$\Phi = \{ x_i \in \mathbb{R}^N \mid \min f(x_i), x_i \in S \} \quad (3.5)$$

Dominância: na minimização, uma solução z^1 domina z^2 se e somente se $z^1 \leq z^2$ e $z^1 \neq z^2$. Isto é, $z^1_i \leq z^2_i$ para todos i 's, tal que $z^1_i < z^2_i$ em pelo menos um i . Algumas vezes o conceito de dominância forte também é aplicado, neste caso ele implica somente com a ocorrência de $z^1 < z^2$, não ocorrendo a possibilidade da igualdade.

No caso da maximização, esses conceitos ocorrem de forma inversa.

Eficiência: a partir do conceito de dominância é definido o conceito de solução eficiente. Uma solução é eficiente se e somente se ela não é dominada por nenhuma das outras soluções da região factível.

Outros nomes como ótimo de Pareto e não dominada são utilizados para denominar uma solução eficiente, já comentado nas secções anteriores.

$$E = \{ (x_E, z_E) \in \mathbb{R}^N \times \mathbb{R}^N \mid z_E \geq z \in \mathbb{R}^N, x_E \in S \} \quad (3.6)$$

Solução de Melhor Compromisso: uma solução é de melhor compromisso quando é eficiente e apresenta o máximo de satisfação para o decisor.

$$x^{**} = \{ (x^{**}, z^{**}) \in \mathbb{R}^N \times \mathbb{R}^N \mid z^{**} = \max U(z(x^{**})), x^{**} \in S \} \quad (3.7)$$

3.4 - MÉTODOS DE RESOLUÇÃO

Como foi mencionado anteriormente, os métodos de PMO geralmente são classificados como: com preferência definida - aplicado quando a FU é conhecida; sem preferência definida - quando a FU é desconhecida; e com articulação das preferências - quando o decisor tem uma certa noção de sua preferência, mas não consegue explicitá-la de modo claro.

Existe no PMO algumas relações importantes entre o esforço computacional, a definição das preferências e o número de objetivos: quanto menor for o grau das preferências do decisor maior será o esforço computacional e quanto maior for o número de objetivos considerados maior será o esforço computacional também.

3.4.1 - Métodos com Preferência Definida

Os métodos com preferência definida são métodos aplicados quando o decisor tem suas preferências definidas com relação aos critérios de seleção. Baseados nas preferências do decisor, os métodos fazem a fusão dos objetivos ou os transformam em metas ou em restrições, resultando em problemas mono-objetivo.

Os principais métodos são:

- Função Utilidade: com as preferências do decisor escritas formalmente através da função utilidade, o método faz uma fusão de vários objetivos resultando-se em um único. Uma dificuldade deste método é exatamente conseguir uma expressão matemática para a FU. Outra dificuldade poderá surgir na resolução do PNL (Programação não-linear) obtido, uma vez que a FU, em geral, é uma função não linear dos critérios de seleção.
- ϵ -restrição: este método tem como finalidade transformar todos os objetivos em restrições, com exceção daquele escolhido pelo decisor. A solução, neste caso, depende tanto do valor escolhido para a demanda ou do suprimento (RHS - *right hand side*) das novas restrições, como também do objetivo remanescente mantido pelo decisor.
- Goal Programming (GP): a idéia principal do método é transformar os objetivos em metas, neste caso o GP procura minimizar a distância entre as metas e a solução. Existem duas variantes para este método: Arquimédiano e Lexicográfico. A primeira variante adota uma preferência (pesos) quantitativa para as distâncias entre as metas e a solução, neste caso a solução depende das preferências e das metas escolhidas pelo decisor. Por outro lado, a segunda variante adota uma preferência qualitativa para as distâncias, uma espécie de hierarquia de minimização das distâncias. Neste caso a solução depende fortemente da hierarquia escolhida pelo decisor.

3.4.2 - Métodos sem Preferência Definida

Esses métodos são aplicados quando o decisor não tem uma preferência definida em relação aos critérios de decisão. Devido à inexistência de uma preferência, esses métodos geram um leque de soluções eficientes, possibilitando uma visão geral do comportamento das soluções. Os principais métodos são:

- Método dos pesos: este método aplica uma combinação de pesos nos objetivos, para formar um único objetivo, uma espécie de média ponderada. O método é

um caso particular no qual a função utilidade é linear. Este método é caracterizado pela facilidade de implementação, no entanto fica restrito aos problemas cujo número de critérios de seleção é baixo. Por exemplo, modelos com mais de 3 objetivos podem torná-lo trabalhoso e confuso.

- Programação paramétrica: seu princípio de funcionamento é muito semelhante ao método anterior, baseando-se na fixação do peso de um dos objetivos como unitário e modificação dos pesos de outros objetivos, tendo como base o objetivo fixado.

3.4.3 - Métodos com Articulação das Preferências ou Interativo

Esses métodos procuram construir ou interpretar as preferências existente na mente do decisor, uma vez que este não consegue explicitá-las matematicamente.

Através das interações homem-máquina, os métodos permitem intervenção humana na busca das soluções e, conseqüentemente, a exploração de todo o conjunto factível. Neste caso, o homem é responsável pela formação do modelo e julgamento/decisão do mérito da solução encontrada, enquanto a máquina é responsável pela execução do cálculo.

Entre os diversos métodos interativos desenvolvidos, descrevem-se, nesta dissertação, cinco famílias deles e apresenta-se uma análise detalhada dos métodos GDF, TOPSIS, ZW e STEM.

Tabela 3.2 - Métodos Interativos e suas Propriedades

Família de Métodos	Métodos Principais	Estilo de Interação	Tratamento das soluções	Aplicação
Redução da Região Factive	STEM	Especificação, Índice e Valores	Redução de Intervalo	PLMO, PNLMO e PLIMO
Ordenação das Preferências	TOPSIS	Especificação, Índice e Valores	Avaliação de Ponto	PLMO, PNLMO e PLIMO
Direção Factive	GDF	<i>Trade-off</i> local exato	Avaliação de Ponto	PNLMO
Busca pela vizinhança	ZW	Comparação de Valores	Avaliação de ponto	PLMO e PLIMO
Multiplicador de Lagrange	ISWT	Comparação de Vetor	Redução de Intervalo	MONLP BCMP

Fonte : Shin & Ravidran,1991

A tabela 3.2 apresenta informações gerais dos métodos interativos estudados, sendo que nos itens a seguir é apresentado os significados das colunas da tabela:

- Métodos Principais: são os principais métodos de cada família;
- Estilo de Interação: é a forma de interação entre o decisor e o método, isto é, tipo de decisão tomado pelo decisor;
- Tratamento de Solução: esta propriedade especifica o caminho utilizado pelo método para chegar a solução, neste caso existe somente duas opções: redução do intervalo e avaliação do ponto. O primeiro refere-se aos métodos que reduzem a região factível S em cada interação até chegar num ponto satisfatório para o decisor. O segundo refere-se aos métodos que buscam a melhor solução baseando-se na direção da preferência do decisor;
- Aplicação: são as possíveis aplicações em cada método: MOLP (linear), MONLP (não linear), BCMP (somente dois critérios) e MOILP (linear inteira).

3.4.1.1 - GDF

Em termos genéricos, o método GDF inicia-se em uma solução factível e interage com o decisor em dois grandes passos: o primeiro faz a busca da direção ótima para encontrar a próxima solução a partir do gradiente da função utilidade ou da preferência do decisor; Como estas não estão explícitas, o GDF utiliza um procedimento para sua sondagem.

O segundo passo determina a distância ótima da movimentação rumo a essa direção ótima, através da resolução do seguinte problema:

$$\max \{ \mathbf{g}^T \mathbf{y} \mid \mathbf{y} \in S \} \quad \text{onde } \mathbf{g} = \sum \lambda_i \nabla_{\mathbf{x}} f_i(\mathbf{x}^{(h-1)}) \quad (3.12)$$

Definido o tamanho do passo, o método gera uma quantidade de pontos pré-determinada sobre a reta definida pela antiga e a nova solução.

Finalmente, o decisor escolhe um dos pontos gerados e compara-os com a solução anterior. Se não houver mudanças, então a solução “ótima” foi encontrada, caso contrário o método inicia uma nova interação e volta ao passo inicial fechando o ciclo.

Este método tem como principal vantagem trabalhar sem fazer modificações na matriz de restrição, além das possibilidades de trabalhar com modelos não-lineares e de utilizar uma parada obrigatória dentro do algoritmo.

A solução de compromisso do GDF depende, basicamente, das decisões feitas no momento das interações entre o decisor e a máquina.

3.4.1.2 - TOPSIS

O TOPSIS (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*) é um método que utiliza dois tipos de soluções ideais: solução ideal positiva (PIS) e solução ideal

negativa (NIS), obtidas pela minimização (PIS) e pela maximização (NIS) de cada objetivo separadamente.

Utilizando os conceitos do PIS e do NIS, o método procura encontrar a solução de melhor compromisso que possua a distância mínima do PIS e a distância máxima do NIS. O método também introduz o conceito de taxa de progresso (AR - *archived rate*), através do qual decisor saberá a porcentagem da distância entre a solução encontrada e o NIS sobre a distância entre o PIS e o NIS. O método também permite ao decisor escolher a métrica que deseja utilizar (L_1 - Manhattan e L_∞ - Tchebychev), segundo Hwang *et alli.* (1993).

O método interativo TOPSIS apresenta algumas características importantes como:

- possibilidade de implementação em problemas multi-objetivos inteiros (MOIP) e não-linear (MONLP), idem ao STEM;
- o método apresenta um grau médio de dificuldade de implementação para o decisor;
- o método apresenta um grau de dificuldade maior para a máquina, pois gera dois pontos ideais, três tabelas *pay-off* e resolve três programas matemáticos;
- o TOPSIS é um método mais acurado, pois analisa o problema sobre duas soluções ideais e ainda gera o AR para ajudar o decisor no julgamento da solução encontrada.

3.4.1.3 - ZW

Este método interativo caracteriza-se principalmente pela simplicidade dos passos na busca de solução. Inicialmente, o método resolve o problema utilizando um sistema de pesos escolhido arbitrariamente. No passo seguinte, ele utiliza esta solução como termo de comparação com outras soluções extremas factíveis de sua vizinhança e as apresenta ao decisor para escolher a sua preferida. Isto é feito repetidamente até encontrar a solução ótima.

De acordo com Teghem & Kunsch (1986), os passos do método são:

- 1) escolha arbitrariamente um sistema de pesos e resolve o problema multi-objetivo;
- 2) identifique as soluções extremas adjacentes eficientes que não tenham rejeições. Se não existir nenhuma, então a solução foi encontrada;
- 3) o decisor responde se deseja trocar a solução por uma das adjacentes;
- 4) através da solução escolhida encontre um conjunto de pesos que a represente e retorne ao passo 2.

Quando o problema for inteiro, é implementada uma segunda fase no algoritmo.

Esta segunda fase utiliza o algoritmo de *Branch and Bound* clássico, tomando como ponto de partida o segundo passo do algoritmo anterior. Um *branch* é feito quando:

- o decisor preferir alguma outra solução inteira;
- todas as soluções eficientes forem vistas de forma negativa ou indiferente.

Este método apresenta algumas características importantes como:

- para os problemas inteiros, a estrutura do algoritmo é inversa em relação a outros algoritmos; uma vez que, normalmente, os métodos utilizam o B&B dentro do próprio algoritmo, ao passo que este o utiliza externamente;
- o uso deste método exige uma coerência na tarefa do decisor, na execução de sua tarefa, senão pode ser que ocorra ciclos durante as interações.

3.4.4 - Método STEM

O método STEM (*STEP method*) foi talvez uma das primeiras técnicas de programação linear multi-objetivo desenvolvida. Teghen & Kunsch (1986) consideram-no o mais eficiente método iterativo. Segundo Steuer (1986), o método foi descrito como procedimento de orientação progressivo por Benayoun, Tergny e Keuneman em 1970, sendo posteriormente desenvolvido pelo próprio Benayoun *et alli.* (1971) como STEM.

O STEM é um método de redução da área factível baseado na solução ideal, que, interage com o decisor pela relaxação da solução encontrada.

Inicialmente, o método calcula a tabela *pay-off* e a solução ideal. No segundo momento, calcula a solução de melhor compromisso e, através de interações homem-máquina, o decisor responde se deseja relaxar algum objetivo, tendo como parâmetro de comparação a solução ideal calculada no início do algoritmo. No caso de uma resposta negativa, a solução “ótima” (de compromisso) é encontrada, senão o decisor responde ao método qual o objetivo e a quantidade que ele deseja relaxar. Através das novas informações fornecidas ao método é encontrada uma nova solução. Com a repetição sucessiva dessa interação com o decisor, a solução de compromisso é encontrada pelo STEM.

Este método possui uma característica importante, a de nunca ter o número de interação maior que o número de objetivos.

A seguir, são apresentados os passos do algoritmo do método STEM (Steuer, 1986):

Tabela 3.3 - Tabela *pay-off*

	z^1	z^2	...	z^N
x_1	z_1^1	z_1^2	...	z_1^N
x_2	z_2^1	z_2^2	...	z_2^N
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\ddots$	$\vdots$
x_N	z_N^1	z_N^2	...	z_N^N

- **passo 1** : inicialmente constrói-se a matriz *pay-off* (como pode ser visto na tabela 3.3), através da otimização individual de cada objetivo, onde z_j^i é o valor do critério j utilizando a solução obtida x_i , sendo que a diagonal principal da matriz é a solução ideal.
- **passo 2** : seja $h = 1$ e m_i o valor mínimo da coluna i da tabela *pay-off*, então o valor de π_i é calculado pela seguinte forma:

$$\pi_i = \begin{cases} \frac{z_i^* - m_i}{z_i^*} \left[\sum_{j=1}^n (c_{i,j})^2 \right]^{-1/2} & \text{quando } z_i^* > 0 \\ \frac{m_i - z_i^*}{m_i} \left[\sum_{j=1}^n (c_{i,j})^2 \right]^{-1/2} & \text{quando } z_i^* \leq 0 \end{cases} \quad (3.8)$$

1º termo | 2º termo

o primeiro termo atribui maior peso aos critérios onde tem-se maior distância relativa e o segundo termo normaliza os gradientes das funções objetivos pela métrica Euclidiana (L_2).

- **passo 3** : neste passo é introduzido o conjunto J^* que contém todos os objetivos já relaxados; no caso da $h = 1$, tem-se $J^* = \emptyset$.
- **passo 4** : seja $h = h+1$ e calcula-se $\lambda_i^{(h)}$

$$\lambda_i^{(h)} = \begin{cases} 0 & \text{se } i \in J^* \\ \frac{\pi_i}{\sum_{j=1}^k \pi_j} & \text{se } i \notin J^* \end{cases} \quad (3.9)$$

- **passo 5 :** neste passo resolve-se o problema minimax

$\{\|z_l - z\|^{\lambda_j^{(k)}}\}$, ou seja:

$$\min \quad \{a\}$$

$$\text{sujeito a} \quad a \geq \lambda_j^{(h)} (z_j - c_j x), \quad 1 \leq j \leq N \quad (3.10)$$

$$x \in S^{(h)}, \quad 0 \leq a \in \mathbf{R}$$

a resolução deste problema significa achar a menor distância (a) entre a solução ideal e a solução de melhor compromisso sobre a métrica de

Tchebychev, ponderadas pelos pesos $\lambda_j^{(h)}$ atribuídos pelo método.

- **passo 6 :** seja $z^{(h)} = z(x^{(h)})$ e compara-se o $z^{(h)}$ com z_l .
- **passo 7 :** se todos os componentes de $z^{(h)}$ satisfazem as preferências do decisor então a solução “ótima” foi encontrada ($z(x^{(h)})$, $x^{(h)}$), caso contrário, dá-se prosseguimento com o passo 8.
- **passo 8 :** este passo é a parte mais importante do método, pois é onde realmente ocorrem as interações entre o decisor e a máquina. Aqui o decisor responde ao método qual o critério de seleção que deseja relaxar e a sua quantidade (Δ_j , $j \in J^*$).
- **passo 9 :** através das informações fornecidas pelo decisor no passo anterior, são adicionadas as seguintes restrições:

$$\begin{aligned} & \bullet c_j x \geq z_j(x^{(h)}) - \Delta_j \quad j \in J^* \\ & \bullet c_j x \geq z_j(x^{(h)}) \quad j \notin J^* \end{aligned} \quad (3.11)$$

O método interativo STEM apresenta algumas características importantes, tais como:

- possibilidade de implementação em multi-objetivo inteira (MOIP) e não-linear (MONLP), desde que o algoritmo resolva os problemas utilizando PIM e PNL, respectivamente;
- uso fácil para o decisor;
- o número de interações do método (h) nunca é maior que o número de objetivos (N);
- oferece ao decisor como parâmetro de decisão a solução ideal;
- o critério de atribuição dos pesos dos objetivos é feita pelo próprio STEM, onde se atribuem maiores valores para aqueles objetivos com maior distância relativa da solução ideal;

- a relaxação aplicada pelo STEM no passo 9 é praticamente um ato de transformar os objetivos em metas, uma vez que esta relaxação significa que há satisfação do decisor pelo valor obtido e ainda que este se dispõe em ceder Δ_j desse valor. Nos outros objetivos são impostos impossibilidades de retração do valor já obtido, exceto nas interações posteriores.

Porém, ele não pode ser aplicado diretamente nos problemas com estrutura de grafo que utilizam algoritmos especializados, já que a cada interação o STEM acrescenta uma nova restrição na matriz dos coeficientes **A**, rompendo a estrutura particular do problema original em grafo.

No próximo capítulo, principalmente a seção 4.3.1, é apresentado uma adaptação do método STEM ao algoritmo de grafo conservativo (GC) com o objetivo de aumentar a performance do algoritmo computacional, a qual é denominado por STEM-Grafo.

CAPÍTULO 4

ALGORITMO COMPUTACIONAL

4.1 - INTRODUÇÃO

O algoritmo computacional é constituído por módulos hierárquicos, onde cada um deles executa uma determinada tarefa. O primeiro módulo da hierarquia é o método iterativo STEM-Grafo que resolve o problema multi-objetivo (ver a figura 4.1). Este é, por sua vez, auxiliado pelo algoritmo de *Branch and Bound* (B&B), que resolve os problemas de programação inteira mista. Da mesma forma, o B&B é auxiliado pelo grafo conservativo (GC) que resolve os problemas lineares.

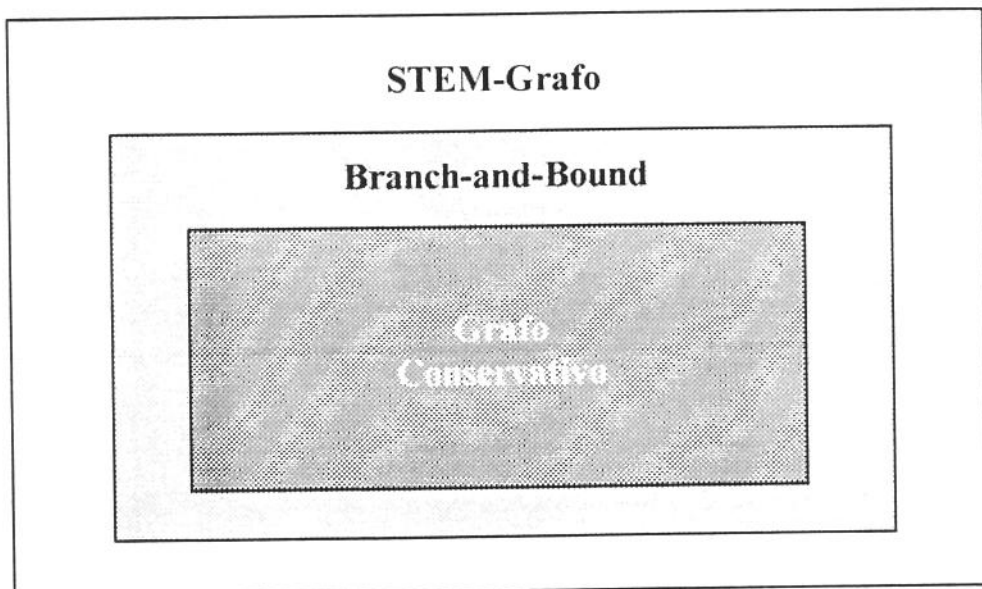


Figura 4.1 - Estrutura do Algoritmo

Algumas características básicas de um algoritmo computacional de média e larga escala são a velocidade, o requisito de memória e, principalmente, a execução das tarefas a que se destina.

Para que se tenha um melhor desempenho do algoritmo computacional, substituiu-se o método Simplex do PL pelo algoritmo do GC no terceiro módulo do algoritmo, pois este

resolve os problemas de PL que apresentam uma estrutura de grafo conservativo (GC)^{4.1}, a uma velocidade de 100 a 150 vezes maior que o método Simplex do PL (Correia, 1988), o que resulta em um tempo computacional menor. Adotou-se também um sistema de hierarquia na escolha do objetivo a ser otimizado, ou seja, a cada interação somente um objetivo é otimizado. Desta forma, cada interação conduz a uma preferência absoluta por um objetivo, o que facilita a tomada de decisão.

No segundo módulo, o algoritmo B&B faz a busca da solução na árvore de enumeração utilizando uma busca em profundidade (ver o anexo 2), pois esta requer menor quantidade de memória e torna o algoritmo mais simples e mais rápido.

No primeiro módulo, o método STEM é adaptado ao GC, pois a cada interação o método STEM acrescenta uma nova restrição que não pertence ao formato particular da matriz de incidência do GC. Maiores detalhes do GC estão descritos no anexo 3.

Outra vantagem é a sua estrutura modular do algoritmo, pois esta facilita a compreensão da lógica do algoritmo bem como sua manutenção, além de permitir o aproveitamento das suas sub-rotinas em outros algoritmos.

4.2 - ESTRUTURA DE DADOS

A estrutura de dados do algoritmo é constituída basicamente por duas estruturas de aspectos informativos e três de aspectos condicionais no controle dos nós do B&B, além de outras variáveis de controle do algoritmo.

As estruturas de aspectos informativos são arco e nó, os quais são utilizados no mapeamento da árvore do GC, tendo a seguinte composição:

Arco	:	origem;
		destino;
		limite inferior;
		limite superior;
		custo variável {
		área alagada
		emissão de poluente
		econômico
		fluxo.

^{4.1} O algoritmo de GC é uma classe especial de PL, especializado em resolver problemas de PL que tenham a matriz dos coeficientes com a estrutura da matriz de incidência do GC.

Nó : recurso ou demanda necessários;
potencial;
nó pai;
arco que o liga ao pai;
nível do nó no grafo conservativo;
pré-ordem do grafo conservativo.

As componentes da estrutura arco são constantes, exceto o fluxo atual que varia durante a execução. Enquanto que a estrutura nó ocorre exatamente o contrário, somente o recurso é constante e as demais são variáveis.

As estruturas condicionais são decisão, condição e informação, que descrevem o nó que está fixo, o estado fixo de cada nó e os dados gerais do nó corrente, respectivamente. Eles são utilizados no controle da árvore de enumeração do B&B.

Estas estruturas têm a seguinte composição:

Decisão : decisão fixa para o nó;
decisão auxiliar que representa se o nó atual está fixo em 1;
estado atual da sondagem do ramo (sim ou não).

Condição : estado fixo de cada nó;
variável auxiliar que representa se o nó está fixo em 1.

Informação : solução incubente;
custo original;
custo relaxado;
custo fixo ;
identificação do arco com fluxo fixo.

4.3 - ESTRUTURA DO ALGORITMO

4.3.1 - Módulo Multi-Objetivo (STEM-Grafo)

A substituição do método simplex pelo GC gera a necessidade de modificar o método STEM, pois o GC não permite inclusões de novas restrições que modifiquem a estrutura básica da matriz de incidência, que o STEM faz a cada interação.

O método STEM original pode ser descrito resumidamente em 5 passos principais:

1) calcula-se a tabela *pay-off* e a solução ideal;

- 2) determina-se os pesos dos objetivos de acordo com a distância entre o maior e menor valor de cada objetivo da tabela *pay-off*;
- 3) determina-se a solução que apresenta a menor distância com relação à solução ideal, ou seja, a resolução de um problema de minimax;
- 4) o decisor interage com a máquina, declarando-se satisfeito ou não satisfeito com a solução encontrada; em caso afirmativo, a solução de compromisso foi encontrada;
- 5) senão, o decisor informa ao método qual o próximo objetivo a ser relaxado e a quantidade relaxada, tais informações define gera novas funções de restrições que definem a nova região factível, e retorna-se ao terceiro passo.

Para que o STEM original fosse adaptado ao GC, modificou-se os passos 2, 3 e 5. Com isso, o STEM modificado foi denominado como STEM-Grafo.

No passo 2, a preferência relativa, relacionada com a estrutura de peso, foi substituída pela preferência absoluta dos objetivos.

No passo 3, o problema do minimax foi substituído pela minimização da soma dos objetivos com seus respectivos pesos, ou seja, uma espécie de método dos pesos.

Supondo-se o seguinte problema:

$$\begin{array}{ll} \min & Cx \\ \text{s.a} & x \in S \end{array} \quad (4.1)$$

Pelo método STEM original, o problema teria a seguinte formação com a inclusão de algumas restrições:

$$\begin{array}{ll} \min & \{a\} \\ \text{s.a} & a \geq \lambda_i^{(h)} (z_i^* - C^i x) \quad 1 \leq i \leq j \\ & x \in S^{(h)} \\ & 0 \leq a \leq R \end{array} \quad (4.2)$$

Com a substituição do PL pelo GC, o problema passará a ter a seguinte formação:

$$\begin{array}{ll} \min & \lambda_i C^i x \\ \text{s.a} & x \in S \end{array} \quad (4.3)$$

Neste mesmo passo, adotou-se um sistema de peso (valores dos λ_i 's), no qual, a cada interação, o objetivo que está sendo otimizado vale $1-(N-1) \cdot 10^{-10}$. Por exemplo, se um problema contém quatro objetivos ($N=4$) e o objetivo 2 é escolhido para ser otimizado, então o peso do objetivo 2 é $9,999999997 \cdot 10^{-1}$ e os pesos dos outros objetivos valem 10^{-10} . Isto garante que a solução obtida seja eficiente (Steuer, 1986).

O passo 5 é mais complicado. Originalmente, o STEM limita o espaço das soluções factíveis por meio de restrições funcionais que representam hiperplanos perpendiculares à direção do objetivo relaxado. Para que não haja acréscimo destas restrições, decidiu-se substituí-las por limitantes superiores e inferiores nas variáveis. Esta substituição leva à obtenção de um conjunto factível diferente do original.

A obtenção desses limites é feita em duas fases: a fase 1 se caracteriza pela identificação do ponto de relaxação ($\mathbf{r}$) na região de soluções factíveis e a fase 2 se caracteriza pela identificação dos pontos de ajuste e a aplicação dos valores de suas componentes como parâmetros para os novos limites superiores ou inferiores.

A fase 1 do passo 5 obtém, primeiramente, o valor do coeficiente alfa (α) a partir do vetor $\mathbf{c}_1$ e dos valores z e z_r , onde:

$$\alpha = \frac{z - z_r}{\sum_{i=1}^N c_i^2} \quad (4.4)$$

Com o valor de α e o ponto $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_N)$ é obtido o ponto $\mathbf{r}$, ver as figuras 4.2 e 4.3.

$$\mathbf{r} = \begin{cases} r_1 = x_1 - c_1 \alpha \\ r_2 = x_2 - c_2 \alpha \\ \vdots \\ r_N = x_N - c_N \alpha \end{cases} \quad (4.5)$$

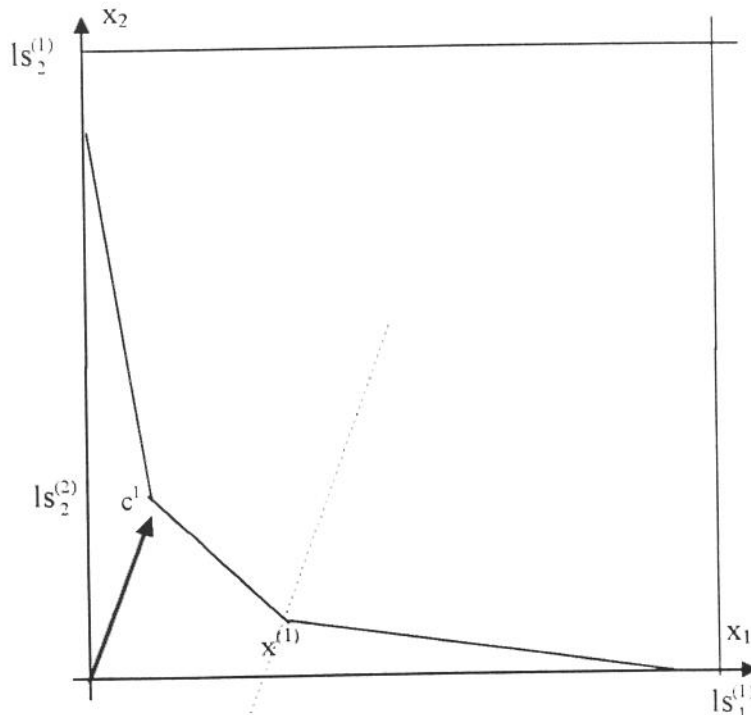


Figura 4.2 - Região Factível Original

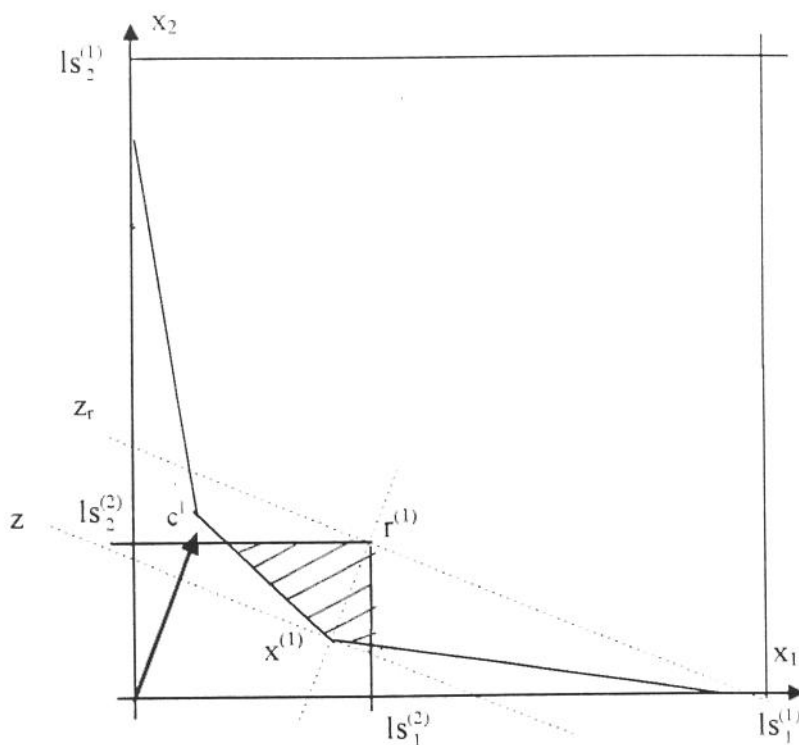


Figura 4.3 - Região Factível Obtida pelo Ponto r

Por outro lado, a aplicação dos limitantes em lugar das restrições funcionais causa perdas em relação à região factível original (região factível obtida pelo STEM original, ou seja, região factível obtida a partir das restrições lineares do PL), principalmente quando uma das coordenadas do objetivo é nula, ou seja, o ângulo (θ) formado pela vetor do objetivo e pela coordenada é 90° , ver a figura 4.5.

Neste caso, as perdas ocorrem quando a mesma componente do ponto r é escolhida como parâmetro para o novo limite superior.

A figura 4.4 mostra a região factível original obtida pelo método STEM original, através da solução ótima do objetivo c^1 (representado pelo ponto $x^{(1)}$). A figura mostra ainda a relaxação dessa mesma solução, donde se obtém a solução relaxada (representada pelo ponto $r^{(1)}$), que é o resultado das informações provenientes da interação entre o decisor e a máquina. Verifica-se também nesta figura que a região factível é definida por retas paralelas às coordenadas a partir do ponto $r^{(1)}$.

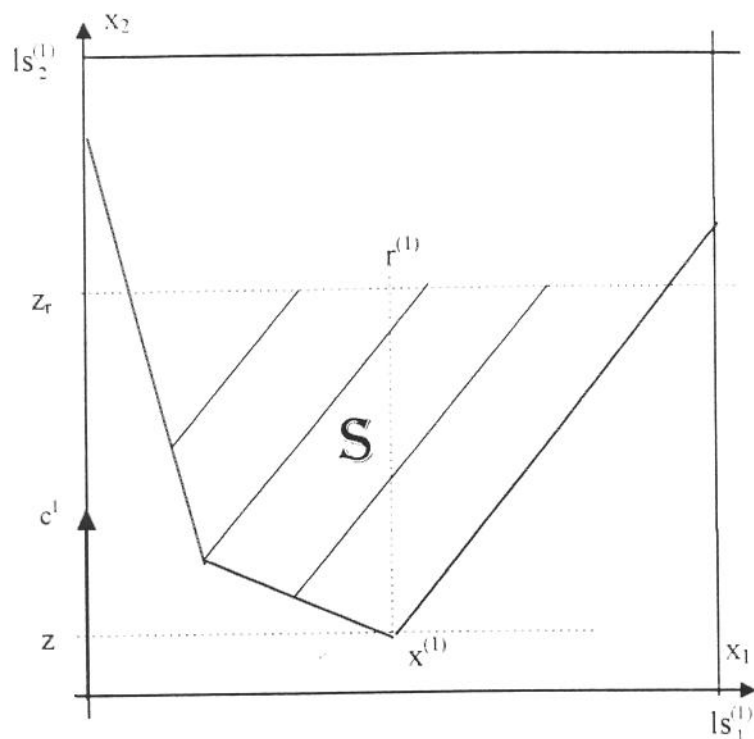


Figura 4.4 - Região Factível Obtida pelo STEM original

Por outro lado, quando as coordenadas do ponto r são utilizadas como parâmetro dos novos limites superiores (conforme sugerido anteriormente), tem-se a região factível dada na figura 4.5, onde se verificam grandes perdas em relação à região factível original. A solução para este caso extremo é a desconsideração da coordenada que tem o ângulo θ_i reto como limite superior ou inferior. No caso, esta interação não irá impor nos limites superior e inferior nestas coordenadas.

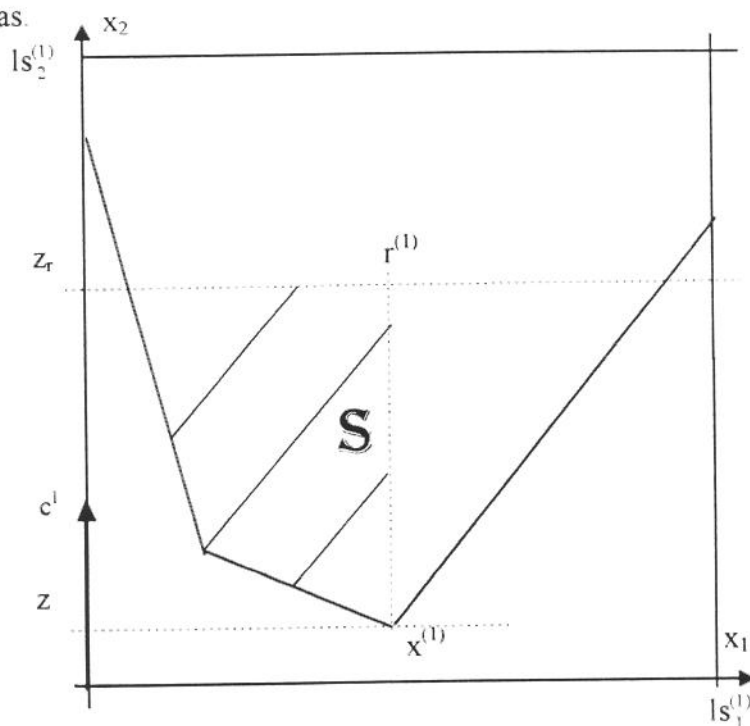


Figura 4.5 Região Factível pelo método STEM-G sem ajuste

Se, por outro lado, o ângulo θ_i é positivo, então a coordenada i do ponto r é adotada como parâmetro para o novo limite superior. A área hachurada da figura 4.6 ilustra este caso.

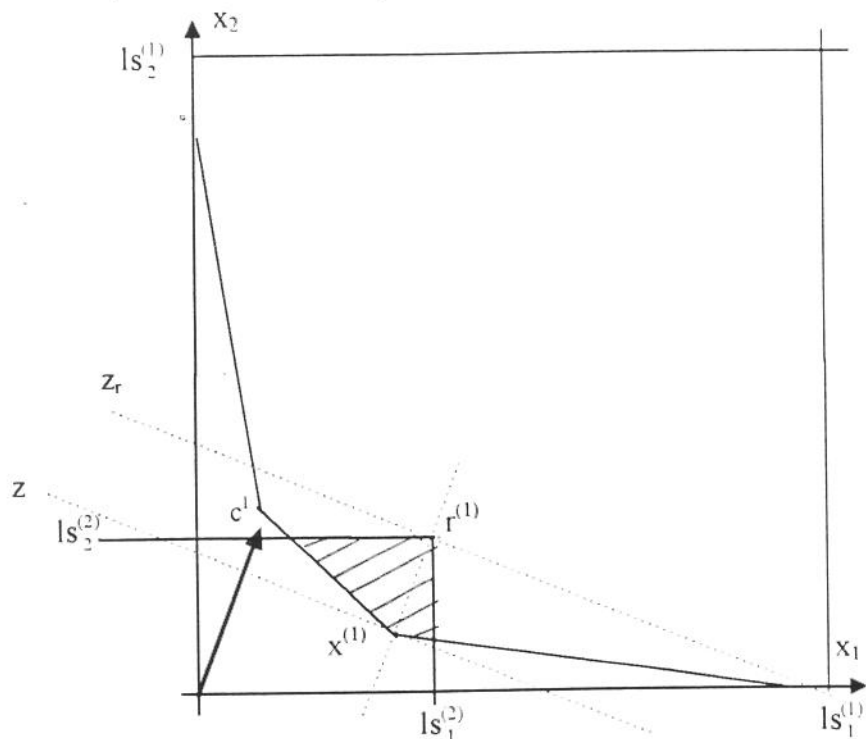


Figura 4.6 - Região Factível com Coordenadas Positivas

Caso o ângulo θ_i seja negativo, então a coordenada i do ponto r é adotada como parâmetro para o novo limite inferior. Na figura 4.7, a coordenada 1 do objetivo c_2 é negativa, e, portanto, a mesma coordenada 1 do ponto r será parâmetro para o novo limite inferior $li_1^{(2)}$.

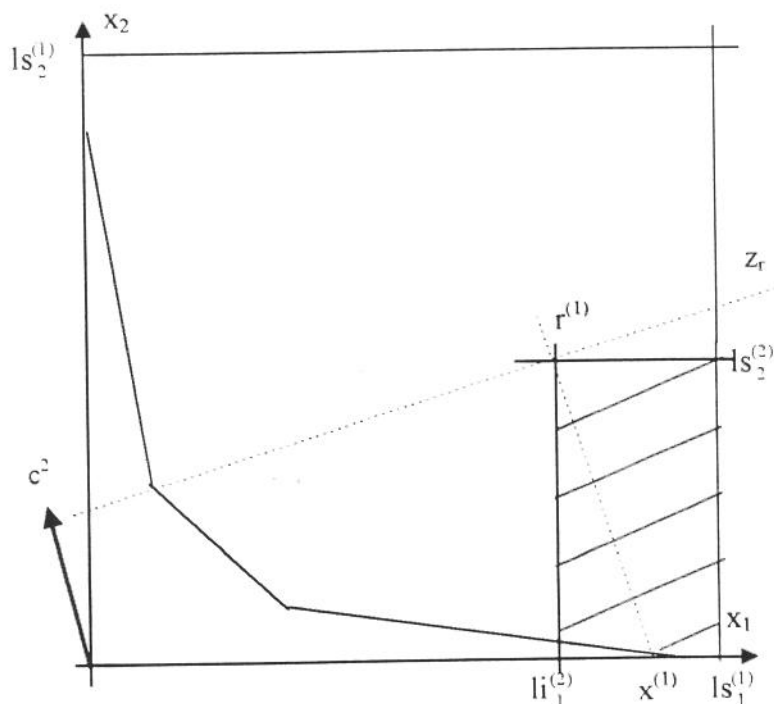


Figura 4.7 - Região Factível com uma Coordenada Negativa

Apesar de todos esses ajustes, os cortes feitos pelos limites superiores e inferiores ainda causam perdas em relação à região factível original.

Na figura 4.8, a região factível obtida pelos limitantes das variáveis aparece circunscrita por traços fortes e as regiões perdidas são representadas por hachuras, sendo que a união dessas duas resultam na região factível original.

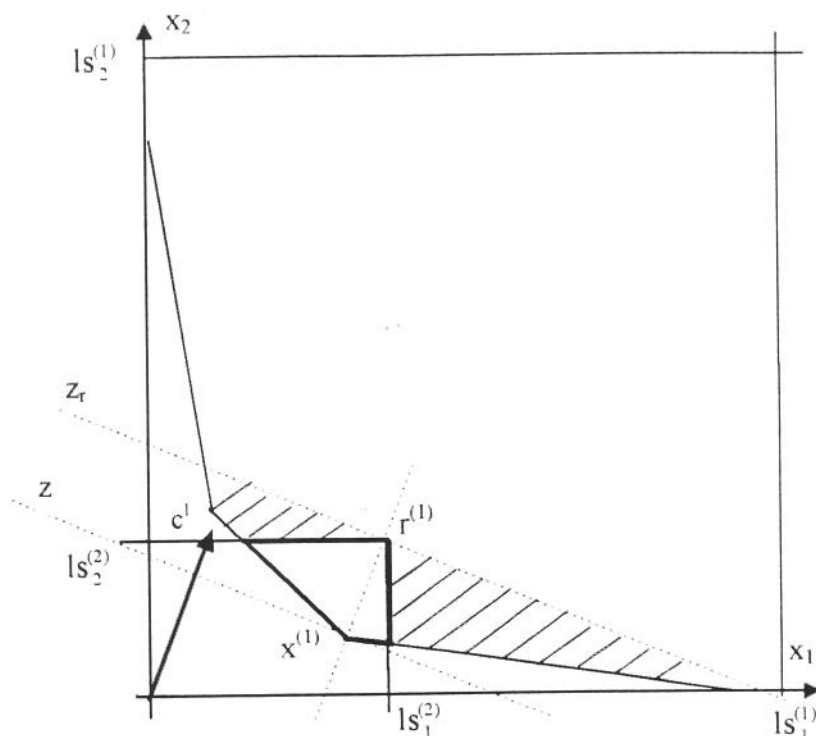


Figura 4.8 - Comparação entre a Região Factível Original e a Região Factível Obtida por Limitantes das Variáveis

Uma forma de amenizar essas perdas é a obtenção de um ponto de ajuste que, além de oferecer parâmetros melhores, pertença também à região factível.

Neste caso, obtém-se primeiramente um ponto de ajuste intermediário (ponto **q**), que, geralmente, não pertence a região factível.

As coordenadas do ponto **q** são obtidas a partir das divisões das respectivas coordenadas do ponto **r** pelo $\cos \theta_i$. Nos casos onde o $\cos \theta_i$ é nulo, a divisão é substituída pela multiplicação, veja a figura 4.9.

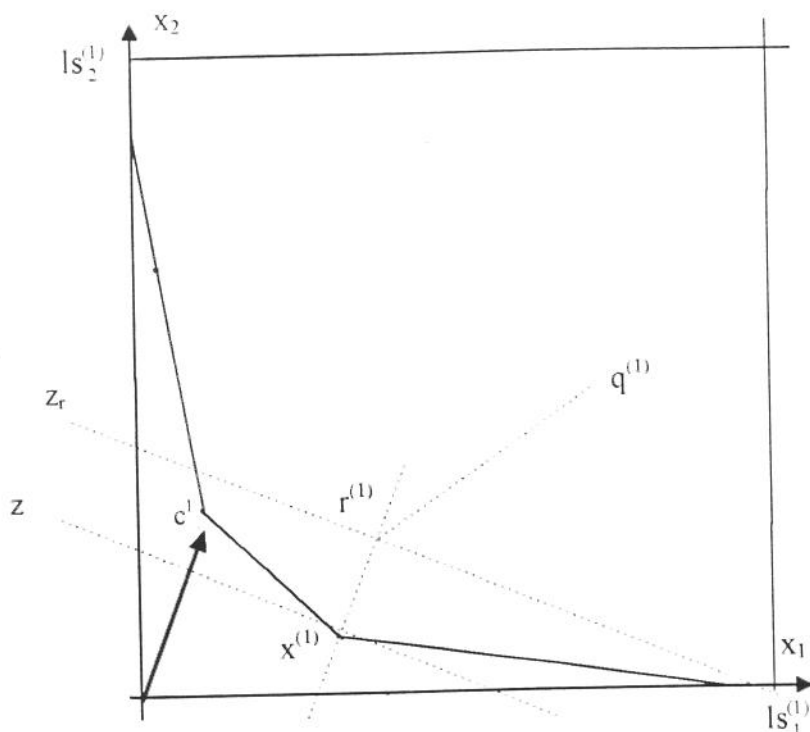


Figure 4.9 - A Busca da Solução de Ajuste Intermediário

Como o ponto q não pertence à região factível, obtém-se um novo ponto de ajuste que pertença à região factível, que passa a ser denominado ponto de ajuste final (ponto p). As coordenadas do ponto p são obtidas a partir do ponto q , o qual caminha em direção ao ponto x , até encontrar o primeiro ponto eficiente; ou seja, o ponto p , (ver a figura 4.10).

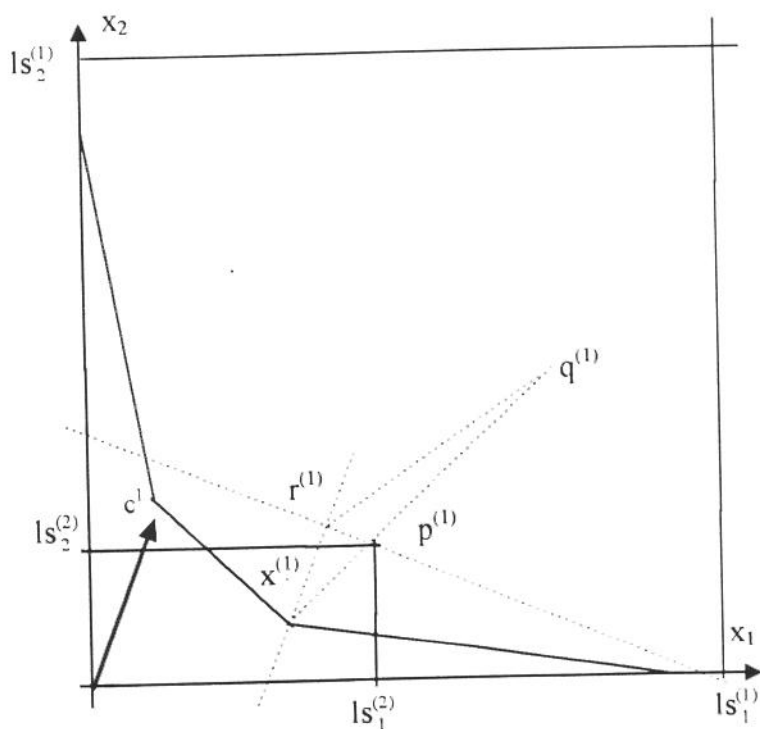


Figure 4.10 - A Busca da Solução de Ajuste Final

A partir dos ajustes propostos nos parágrafos anteriores, a fase 2 do passo 5 iniciar-se-á com a busca do ponto q a partir do ponto r .

$$\mathbf{q} = \begin{cases} q_i = r_i \cos \theta_i & \text{se } c_i = 0 \\ q_i = r_i / \cos \theta_i & \text{se } c_i \neq 0 \end{cases} \quad (4.6)$$

$$\text{onde } \cos \theta = \begin{cases} \cos \theta_1 = c_1 / \sum c^2 \\ \cos \theta_2 = c_2 / \sum c^2 \\ \vdots \\ \cos \theta_N = c_N / \sum c^2 \end{cases} \quad (4.7)$$

Utilizando o mesmo raciocínio da fase I, o ponto $\mathbf{p}$ é obtido a partir do ponto $\mathbf{q}$ com a definição do vetor $\bar{\mathbf{d}}$ e do coeficiente beta (β). Ou seja:

$$\bar{\mathbf{d}} = \begin{cases} d_1 = x_1 - q_1 \\ d_2 = x_2 - q_2 \\ \vdots \\ d_N = x_N - q_N \end{cases} \quad (4.8)$$

$$\text{e } \beta = \frac{z_q - z_r}{\sum_i c_i d_i} \quad (4.9)$$

E finalmente é obtido o ponto $\mathbf{p}$:

$$\mathbf{p} = \begin{cases} p_1 = q_1 - \beta d_1 \\ p_2 = q_2 - \beta d_2 \\ \vdots \\ p_N = q_N - \beta d_N \end{cases} \quad (4.10)$$

As figuras 4.11 a 4.16 mostram um exemplo com a resolução completa de um problema com 3 objetivos, a serem minimizados utilizando o STEM-Grafo, onde a região circunscrita por traços mais grossas é o conjunto $\mathbf{S}$.

Na figura 4.11, tem-se o problema com três objetivos a serem minimizados e a região das soluções factíveis ($\mathbf{S}$), ou seja $\mathbf{S}^{(1)}$.

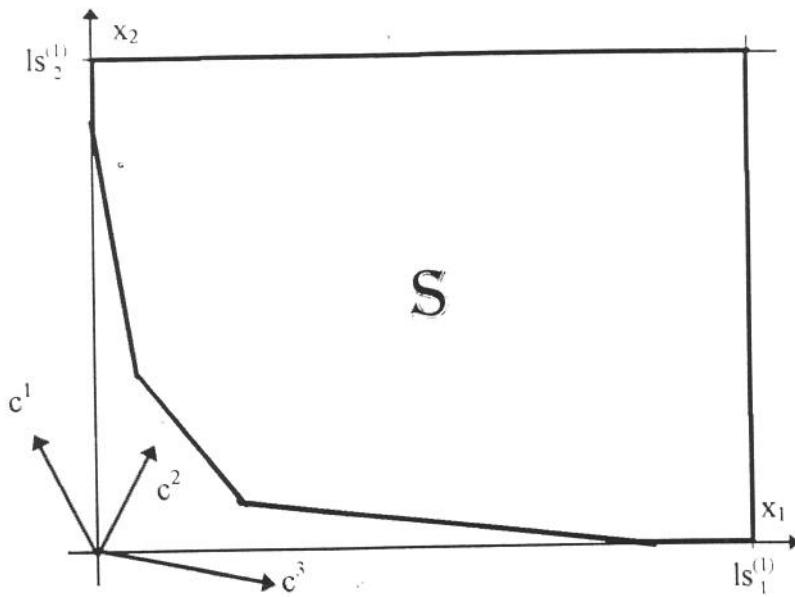


Figura 4.11 - Problema com Três Objetivos

Na figura 4.12, é executada a primeira fase da primeira interação com a obtenção da primeira solução factível $\mathbf{x}^{(1)}$, com a minimização do objetivo c_2 . Considera-se que o decisor não tenha ficado satisfeito com a solução encontrada e dispõe-se a relaxar a solução obtida até $\mathbf{z}_r^{(1)}$ e otimizar o objetivo c_1 . Por meio dessas informações é obtido o ponto de relaxação $\mathbf{r}^{(1)}$.

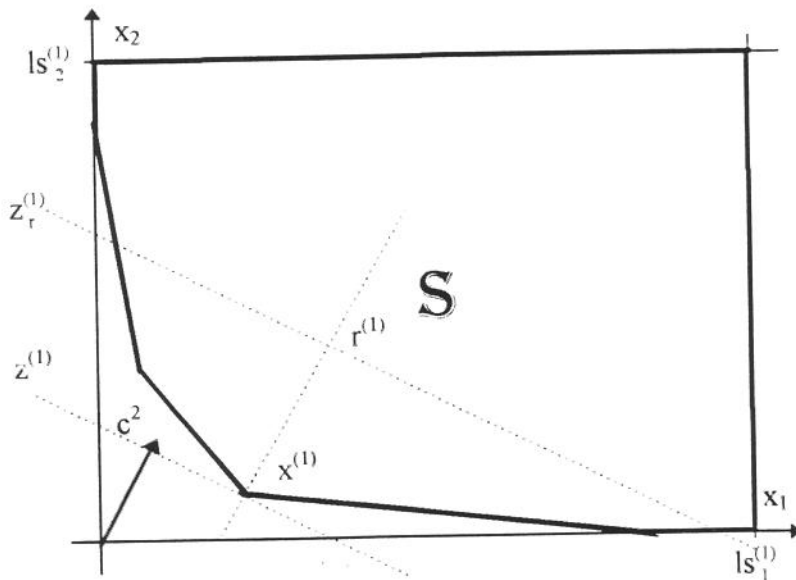


Figura 4.12 - Solução do Problema na Fase 1 da Interação 1

A figura 4.13 mostra a execução da segunda fase, com a obtenção do ponto de ajuste intermediário $\mathbf{q}^{(1)}$ e do ponto de ajuste final $\mathbf{p}^{(1)}$, ambos provenientes da solução relaxada $\mathbf{r}^{(1)}$. Como as duas componentes do objetivo c_2 são positivas, portanto as componentes $p_1^{(1)}$ e $p_2^{(1)}$ serão parâmetros para a escolha dos novos limites superiores $ls_1^{(2)}$ e $ls_2^{(2)}$ que definirão a nova região factível $\mathbf{S}^{(2)}$. Como as coordenadas $p_1^{(1)}$ e $p_2^{(1)}$ são menores que os limites superiores

$ls_1^{(1)}$ e $ls_2^{(1)}$ da primeira interação, então os limites superiores $ls_1^{(2)}$ e $ls_2^{(2)}$ serão iguais às coordenadas $p_1^{(1)}$ e $p_2^{(1)}$. A nova região factível $S^{(2)}$ aparece circunscrita por traços fortes na figura 4.13.

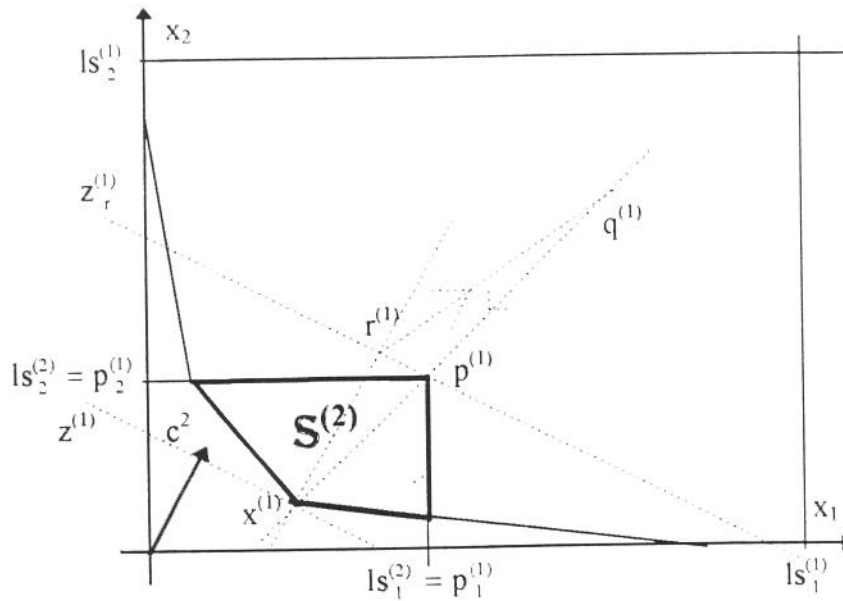


Figura 4.13 - Solução do Problema na Fase 2 da Interação 1

Na figura 4.14, inicia-se a primeira fase da segunda interação com a otimização do objetivo c^1 na nova região factível $S^{(2)}$, que permite a obtenção da nova solução factível $x^{(2)}$. Considerando-se que o decisor novamente não tenha ficado satisfeito com a solução $x^{(2)}$, mas se dispõe a relaxá-la até $z_r^{(2)}$ e otimizar o objetivo c_3 , então é obtida a solução relaxada $r^{(2)}$.

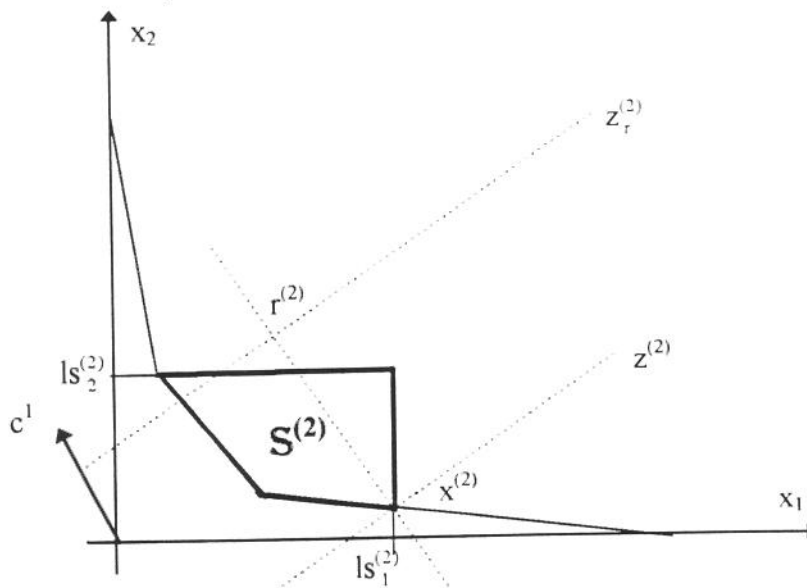


Figura 4.14 - Solução do Problema na Fase 1 da Interação 2

Na figura 4.15, inicia-se a segunda fase da segunda interação, com a obtenção dos novos pontos de ajuste intermediário e final ($q^{(2)}$ e $p^{(2)}$, respectivamente), a partir do ponto de relaxação $r^{(2)}$. As componentes do ponto $p^{(2)}$ serão os parâmetros para a escolha dos novos limites que irão definir a formação da nova região factível ($S^{(3)}$).

Sendo negativa a primeira componente do objetivo c_1 e positiva a segunda componente, então os limitantes da abscissa e ordenada serão inferior e superior, respectivamente. Por outro lado a primeira componente do ponto $p_1^{(2)}$ é maior que $li_1^{(2)}$, portanto $li_1^{(3)}$ será igual a $p_1^{(2)}$ e da mesma forma tem-se a segunda componente do ponto $p_1^{(2)}$ maior que o $ls_2^{(2)}$, logo $ls_1^{(3)}$ será igual a $ls_2^{(2)}$ (pois neste caso trata-se do limite superior). A partir dos novos limites superiores e inferiores, e a região factível anterior, é definida a nova região factível $S^{(3)}$.

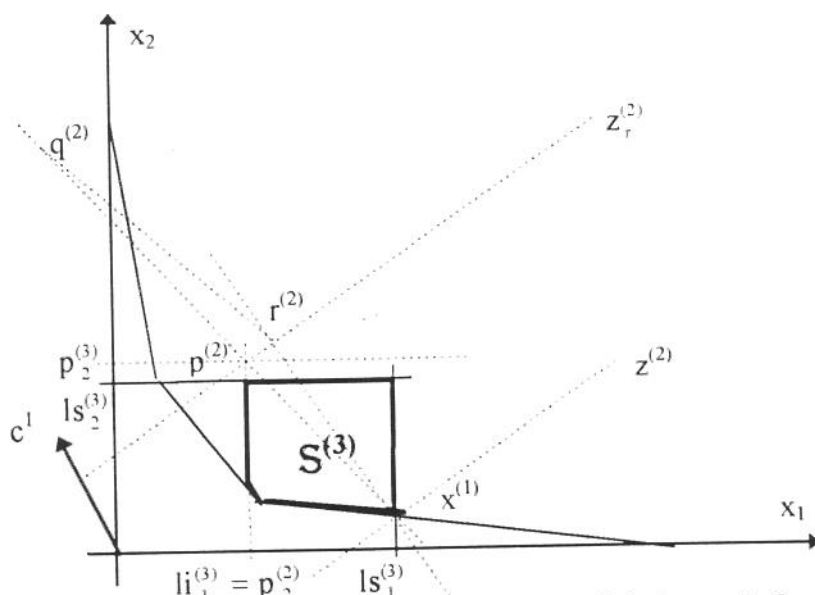


Figura 4.15 - Solução do problema na Fase 2 da Iteração 2

Na figura 4.16, é obtida a solução de compromisso $x^{(3)}$, com a otimização do objetivo c^3 . Como não existem mais objetivos a serem minimizados e o decisor continua insatisfeito com a solução obtida, então não existe solução de compromisso; senão $x^{(3)}$ é a solução de compromisso.

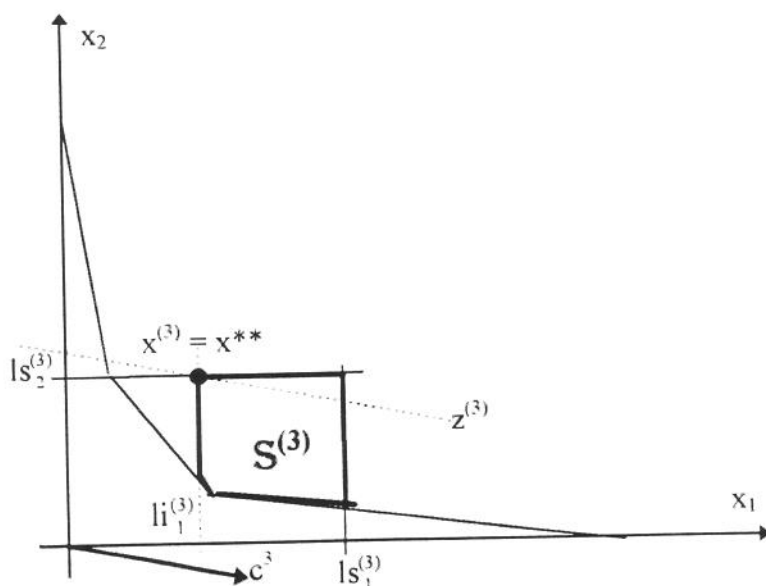


Figura 4.16 - Solução de Compromisso do Problema

Deve-se lembrar que quando o número de interação for maior que o número de variáveis, é possível que a solução de compromisso não seja uma solução eficiente. Ou seja o número de alternativas é menor que o número de objetivos, como é o caso desse exemplo. Apesar de que este evento raramente ocorre.

4.3.2 - Módulo Inteiro (PIM/B&B) e Módulo Grafo (GC)

Os dois últimos módulos do algoritmo praticamente não foram modificados em relação às suas estruturas originais, pois ambos algoritmos utilizam uma estrutura de representação semelhante. Informações adicionais podem ser encontradas nos anexos 2 e 3.

4.4 - CÓDIGO COMPUTACIONAL

No algoritmo, a escolha das variáveis inteiras para o *branch* é feita na ordem decrescente do limitante superior das respectivas variáveis.

A seguir é apresentado um pseudo-código (pseudo-pascal) do programa principal com o método STEM-G incorporado e o procedimento *Branch-and-Bound* do algoritmo.

```

PROGRAM PRINCIPAL
BEGIN
  zera variáveis
  INF ← 1.0E+10
  ZERO ← 1.0E-10
  inter2 ← 0
  identifica o custo fixo e o custo fixo geral
  {-----STEM-----}
  TAB_PAY_OFF
  calculado ← F
  REPEAT
    o decisor escolhe o objetivo a ser otimizado
    BRANCH_AND_BOUND
    imprime a solução ideal e a solução encontrada
    {-----Interação com o Decisor-----}
    o decisor responde se está satisfeito com a solução encontrada
    IF sim THEN calculado ← T
    IF ã-calculado THEN
      BEGIN
        o decisor define novo objetivo a ser otimizado e a quantidade
        a ser relaxada do objetivo já otimizado
        {----- cálculo dos limites -----}
        cálculo dos limitantes
        define se os limitantes calculados devem ser limites
        superiores ou inferiores
        substituição dos antigos limites pelos novos limites
        END
      UNTIL calculado
    {-----Saída de Dados-----}
  saída de dados
END. {Principal}
  
```

```

PROCEDURE BRANCH_AND_BOUND
BEGIN
  (i,  $\bar{z}$ ,  $\underline{z}$ )  $\leftarrow$  (0, INF, ZERO)
  enumerado  $\leftarrow$  F
  inter  $\leftarrow$  0
  explora (i,  $\bar{z}$ ,  $\underline{z}$ )
  imprime resultado
  REPEAT
    IF (z_rlx  $\geq$  z_inc) OR (next_d_fix = 0) THEN
      BEGIN
        inter  $\leftarrow$  inter + 1
        WHILE (n-enumerado AND sondado) THEN BACKTRAKING
        IF (n-enumerado) THEN ajusta variáveis
      END;
    ELSE
      BEGIN
        escolha da variável de branch
        BRANCH
      END;
    IF (n enumerado AND z_fac < z_inc) THEN ajusta solução
  UNTIL Enumerado
  recupera dados do nó ótimo
  explora nó ótimo
  z_inc  $\leftarrow$  z_fac
END: {B&B}

```

4.5 - EXEMPLO DE RESULTADO OBTIDO PELO PROGRAMA

Nesta secção é apresentado um dos resultados obtidos pelo programa computacional utilizando uma interface mais amigável que auxilia o decisor na tomada da decisão.

de.chan[26] stemg
 Arquivo de entrada: sse3.d
 Tolerancia (0,1] :0.001
 Executando !

	si	obj1	obj2	obj3	obj4
sol 1	1113.003	1113.003	30849.825	10474.422	5500.250
sol 2	30395.768	2456.848	30395.768	10474.422	5472.300
sol 3	0.919	7459.247	47101.120	0.919	2234.300
sol 4	2234.300	7459.247	47078.860	1.689	2234.300

Em Ordem de Hierarquia
 Qual e o primeiro objetivo a ser maximizado ?
 Digite 0 se desejar nenhum !
 > 1

	si	sol1
obj 1	1113.003	1113.003
obj 2	30395.768	30849.825
obj 3	0.919	10474.422
obj 4	2234.300	5500.250

Esta satisfeito com a solucao (s/n) ? n

Em Ordem de Hierarquia

Qual e o proximo objetivo a ser maximizado ?

Digite ZERO se nao deseja otimizar mais nenhum objetivo !

> 2

Ate que valor deseja relaxar o objetivo 1 (anterior) ? 2500

	si	sol1	sol2
obj 1	1113.003	1113.003	1471.380
obj 2	30395.768	30849.825	30760.548
obj 3	0.919	10474.422	10474.422
obj 4	2234.300	5500.250	5500.250

Esta satisfeito com a solucao (s/n) ? n

Em Ordem de Hierarquia

Qual e o proximo objetivo a ser maximizado ?

Digite ZERO se nao deseja otimizar mais nenhum objetivo !

> 3

Ate que valor deseja relaxar o objetivo 2 (anterior) ? 30800

	si	sol1	sol2	sol3
obj 1	1113.003	1113.003	1471.380	1488.287
obj 2	30395.768	30849.825	30760.548	30776.035
obj 3	0.919	10474.422	10474.422	10425.075
obj 4	2234.300	5500.250	5500.250	5497.811

Esta satisfeito com a solucao (s/n) ? n

Em Ordem de Hierarquia

Qual e o proximo objetivo a ser maximizado ?

Digite ZERO se nao deseja otimizar mais nenhum objetivo !

> 4

	si	sol1	sol2	sol3	sol4
obj 1	1113.003	1113.003	1471.380	1488.287	1488.287
obj 2	30395.768	30849.825	30760.548	30776.035	30776.035
obj 3	0.919	10474.422	10474.422	10425.075	10425.075
obj 4	2234.300	5500.250	5500.250	5497.811	5497.811

Todos os objetivos ja foram selecionados

Tecla ENTER para continuar

Tempo de conexao: 4167 milissegundos

Tempo de execucao: 516 milisegundos

```

RRRRRR EEEEEEE SSSSS U   UL   TTTTTT AAA DDDDD   OOO   SSSSS
R   RE   S   U   UL   T   A   A   D   D   O   O   S
R   RE   S   U   UL   T   A   A   D   D   O   O   S
RRRRRR EEEEEEE SSSSS U   UL   T   A   A   D   D   O   O   SSSSS
RR   E   S   U   UL   T   A   A   D   D   O   O   S
R RR   E   S   U   UL   T   A   A   D   D   O   O   S
R   RR EEEEEEE SSSSS UUUUU LLLLLL T   A   A DDDDD   OOO   SSSSS

```

----- Tabela PAY-OFF -----

	si	obj1	obj2	obj3	obj4
sol 1	1113.003	1113.003	30849.825	10474.422	5500.250
sol 2	30395.768	2456.848	30395.768	10474.422	5472.300
sol 3	0.919	7459.247	47101.120	0.919	2234.300
sol 4	2234.300	7459.247	47078.860	1.689	2234.300

----- SEQUENCIA DE SOLUCAO -----

	si	sol1	sol2	sol3	sol4
obj 1	1113.003	1113.003	1471.380	1488.287	1488.287
obj 2	30395.768	30849.825	30760.548	30776.035	30776.035
obj 3	0.919	10474.422	10474.422	10425.075	10425.075
obj 4	2234.300	5500.250	5500.250	5497.811	5497.811

----- SEQUENCIA DE OBJETIVO E VALORES RELAXADO -----

	objetivo	valor relaxado
1	1	2500
2	2	30800
3	3	10450
4	4	0

Digite "s" para visualizar o resultado dos arcos

> s

----- RESULTADOS DOS ARCOS -----

arco	1	2	3	4	5
0	0.000	393.000	669.000	0.000	318.000
5	0.000	755.000	425.000	425.000	425.000
10	425.000	1.339	0.939	323.000	275.000
15	0.933	228.000	270.000	33.771	90.897
20	555.121	1120.000	940.000	940.000	2160.000
25	700.000	700.000	700.000	400.000	700.000
30	850.000	4675.000	0.000	0.000	344.000
35	0.000	877.000	0.000	0.000	0.000
40	0.000	0.000	223.661	144.061	0.000
45	0.000	102.067	0.000	0.000	68.229
50	146.103	4.879	0.000	0.000	0.000
55	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
60	0.000	0.000			

de.chan[27]

CAPÍTULO 5

ESTUDO DE CASO

5.1 - DEFINIÇÕES DO PROBLEMA

O objeto de estudo é a avaliação das alternativas de suprimento de energia elétrica para o Sistema Interligado Sul-Sudeste, em razão, principalmente do esgotamento do potencial hidráulico econômico do sistema, tendo em conta ainda a sua importância na participação da demanda de energia elétrica do país.

Serão consideradas as alternativas com potencial no fornecimento de energia elétrica para o sistema interligado sul-sudeste, como:

- usinas hidrelétricas (UHE) situadas na Amazônia e no rio Tocantins;
- pequenas usinas hidrelétricas situadas no próprio sistema interligado;
- parque de termelétricas (UTE) de diversos combustíveis na própria região;
- cogeração com bagaço de cana;
- conservação de energia.

As alternativas naturais para suprir a demanda elétrica do sistema interligado seriam os grandes aproveitamentos da Amazônia e do rio Tocantins, mantendo-se a prioridade pelos aproveitamentos dos potenciais hidrelétricos, aptidão natural do país. Estes aproveitamentos caracterizam-se pelo elevado investimento inicial e por um custo de transporte apreciável. Foi considerado também o aproveitamento dos potenciais hidrelétricos residuais da própria região do sistema interligado, que por sua vez se caracterizam pela melhor modularidade e menores perdas no transporte, apesar da desvantagem da capacidade limitada de geração.

Uma alternativa às UHE's são as termelétricas, uma vez que estas não alagam áreas e têm-se mostradas cada vez mais competitivas. A evolução tecnológica, as reservas de carvão disponíveis na Região Sul do país, a possibilidade de importação do gás natural (GN) boliviano e argentino e os custos baixos do óleo combustível são os principais fatores que viabilizam a geração de energia elétrica a partir das termelétricas. No entanto, a queima desses combustíveis emite poluentes.

Outra fonte de geração que tem-se mostrado competitiva é a cogeração com o bagaço de cana por parte do setor sucro-alcooleiro, pois o excedente da energia gerada pode ser vendido às concessionárias energéticas. Por outro lado, o custo marginal de expansão da geração de longo prazo é US\$ 34 por MWh (segundo a Eletrobras (1993)), portanto abaixo da faixa pedida pelo setor sucro-alcooleiro para viabilizar seus investimentos, que varia em torno de US\$ 45 a 60 por MW. Segundo Walter (1994), o Estado de São Paulo tem um potencial de produção de 3660 MW médios com a tecnologia BIG-STIG até o ano de 2014.

A conservação de energia também é uma opção bastante interessante, além de permitir a postergação dos investimentos do setor elétrico na parte de geração (o mesmo acontece com a opção anterior, neste caso o investimento é repassado para o setor privado), não gera poluição nem produz alagamento. Segundo as estimativas da ELETROBRÁS no cenário II do plano 2015, o país tem um potencial de conservação de energia elétrica de 75,8 TWh.

Levando em consideração todas as alternativas anteriormente citadas, obtiveram-se cerca de 200 a 300 obras participantes da expansão até o ano de 2025. Em função as dimensões do problema proveniente dessa grande quantidade de obras criaram-se algumas simplificações na consideração desses dados. Entre elas, destacam-se a redução do número de alternativas para 31

Dessas 31, 20 delas representam uma aglutinação de usinas térmicas e hídricas menores de 200 MWmed, cogeração e conservação de energia. Essas unidades de geração são as UHE's localizadas no rio Tocantins, baixo Xingu, além de agregados de pequenas UHE's no próprio sistema interligado, um parque de geração termelétrica - que se utiliza diversos combustíveis (GN, carvão e óleo combustível) e diversas tecnologias -, programas de conservação de energia e unidades de cogeração; que por simplificação são representadas por variáveis reais, devido ao porte de suas gerações. E outras 11 são as alternativas maiores que são representados por variáveis inteira.

Também desconsiderou-se os aspectos hidráulicos do problema, devido à sua pequena relevância na análise de longo prazo segundo Campodórico (1989), no qual os custos operacionais podem ser introduzidos exogenamente.

Considerou-se também o benefício energético no lugar da energia firme, pois este representa melhor o potencial de geração do sistema, ver Zylberstajn & Bernini (1993).

Quando aos aos critérios de seleção, foram considerados :

- alagamento de terra ou área alagada;
- custo econômico;
- emissão de poluente;
- conservação de energia (eficiência).

No primeiro critério, a área foi considerada como homogênea, sem a distinção do valor real das terras e levando em conta tão-somente o tamanho da área. Por outro lado, é difícil distinguir se uma área propicia à mineração é mais representativa que uma área agricultável ou não.

Os custos das termelétricas foram obtidos a partir de simulações com o modelo MESSE (Modelo de Simulação a Sub-Sistemas Equivalentes), adotando-se valores médios para os fatores de capacidades esperados, segundo Ennes (1993).

No terceiro critério, considerou-se apenas os índices de emissão do SO₂ para as diversas tecnologias de UTE, pois este estudo se restringe a região sul-sudeste e a emissão do SO₂ tem um efeito mais regionalizado. Por outro lado, não há nada que impeça o uso da emissão de outros poluentes como: CO₂ e NO_x, bem como uma composição destes e de outros poluentes.

Quanto ao quarto critério, os índices referentes às eficiências das alternativas à base de turbinas a gás foram obtidas de (Gás, 1995), aqueles que são referente às turbinas a vapor foram obtidas de (El-Wakil, 1991) e os índices das alternativas de cogeração considerou-se também o vapor utilizado nos processos industriais. As eficiências das UHE's foram assumidas como 85% e 90% para os aproveitamentos de pequeno porte e grande porte, respectivamente. Ou seja, se o benefício energético é 940 MWm e a eficiência é 38% então a energia perdida é 582,8 ($940 \cdot (1 - 0.38)$), com isso é obtida o critério de energia perdida. Ou seja a maximização da conservação da energia significa a minimização da energia perdida.

Os requisitos de mercado adotados são referentes ao Cenário II do Plano 2015, do qual considerou-se as taxas de crescimento a partir de 1990 e uma taxa média de crescimento em torno de 4,0 % a.a., o que resulta um requisito de 14.824 MWh de energia.

A tabela 5.1 apresenta as 31 alternativas selecionadas a partir das 200 a 300 obras participantes da expansão até o ano de 2025 com as simplificações propostas nos parágrafos anteriores. Sendo que as 11 primeiras alternativas são inteiras, ou seja, são construídas ou não construídas, enquanto outras 20 são aglutinação de usinas menores que 200 MWmed são alternativas não inteiras que por simplificação podem ser construídas em partes não inteiras.

Tabela 5.1 - Alternativas Seleccionadas

N°	NOME DA USINA	TIPO	EFICIÊNCIA ENERGÉTICA (%)	BENEFÍCIO ENERGÉTICO (MWm)	ENERGIA FIRME (MWm)	POTÊNCIA (MW)	INVESTI MENTO (US\$/kW)	ÁREA DO RESERVAT. (km²)	EMIÇÃO (tSO ₂ /a)	ENERGIA PERDIDA MWm
1	BELO M'ONTE	H	90	4675	4675	11000	2000	1225		467 50
2	CAMPOS NOVOS	H	90	393	393	880	1447	32		39 30
3	MACHADINHO	H	90	669	615	1200	1672	266		66 90
4	GARABI - 50%	H	90	344	358	900	1685	392		34 40
5	BARRA GRANDE	H	90	318	318	690	1804	95		31 80
6	SERRA DA MESA	H	90	877	605	1200	2378	1783		87 70
7	ITÁ	H	90	755	797	1620	1245	139		75 50
8	CARVÃO IMP GASEIFICAÇÃO	T	40	425	425	500	2200		283	255 00
9	CARVÃO IMP GASEIFICAÇÃO	T	40	425	425	500	2200		283	255 00
10	CARVÃO IMP GASEIFICAÇÃO	T	40	425	425	500	2200		283	255 00
11	CARVÃO IMP GASEIFICAÇÃO	T	40	425	425	500	2200		283	255 00
12	BARRA DO PEIXE	H	85	225	225	450	3580	1030		33 75
13	FOZ DO BEZERRA	H	85	145	145	300	2427	615		21 75
14	CAPIM BRANCO	H	85	323	282	600	1600	131		48 45
15	CANA BRAVA	H	85	275	268	450	1568	139		41 25
16	ITAOCARA	H	85	103	103	210	2445	83		15 45
17	SÃO JERÔNIMO	H	85	228	208	444	1458	97		34 20
18	SAPUCAIA/ANTA	H	85	270	153	316	1302	23		40 50
19	SERRA DO FACÃO	H	85	102	102	210	2384	298		15 30
20	BOCAINA	H	85	237	98	150	2617	439		35 55
21	CARVÃO NACIONAL CONV.	T	35	560	560	700	1800		5664	364 00
22	CARVÃO NA LEITO FLUID.	T	35	1120	1120	1400	2000		566	728 00
23	ÓLEO COMB SEM DESULF.	T	38	940	940	1175	1500		2827	582 80
24	ÓLEO COMB COM DESULF.	T	36	940	940	1175	1800		283	601 60
25	GÁS NATURAL	T	50	2160	2160	2400	1000		2,35	1080 00
26	CONSERVAÇÃO CUSTO < 15	-	100	700	700	1000	600			0 00
27	CONSERVAÇÃO CUSTO < 25	-	100	700	700	1000	1000			0 00
28	CONSERVAÇÃO < 40	-	100	700	700	1000	1600			0 00
29	COGERAÇÃO PROCESSO	T	80	400	400	1000	500			80 00
30	COGERAÇÃO (COND. PARC.)	T	50	700	700	1000	800			350 00
31	COGERAÇÃO C/ GASEIF.	T	65	850	850	1000	1200			297 50
TOTAL				20813		35470	1639(1)	6786	10474	

Fonte : Ennes *et alli.* (1993) e Chan & Correia (1994).

5.2 - FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

Como o estudo de caso permite a busca de solução pelo GC, isto permite representá-lo tanto pela formulação da programação linear como pelo grafo.

O modelo de programação linear tem a seguinte formulação matemática para o estudo de caso:

$$\min z^1 = \left(\sum_{i=1}^{20} c_i x_i + \sum_{l=1}^{11} c_l y_l \right)$$

$$\min z^2 = \left(\sum_{i=1}^{20} e_i x_i + \sum_{l=1}^{11} e_l y_l \right)$$

$$\min z^3 = \left(\sum_{i=1}^{20} c_i x_i + \sum_{l=1}^{11} c_l y_l \right)$$

$$\min z^4 = \left(\sum_{i=1}^{20} \eta_i x_i + \sum_{l=1}^{11} \eta_l y_l \right)$$

sujeito a

- restrições físicas

$li_i \leq x_i \leq ls_i$ e $li_l \leq y_l \leq ls_l$ (limite máximo e mínimo de cada alternativa)

- restrições de atendimento ao mercado

$$\sum_{i=1}^{20} x_i + \sum_{l=1}^{11} y_l \geq D \quad (\text{atendimento da demanda a partir das alternativas})$$

- restrições de conjunto

$i \in \{1, 2, \dots, 20\}, l \in \{1, 2, \dots, 11\}, x_i \in \mathbf{R} \text{ e } y_l \in \mathbf{B}$

A representação do estudo de caso pelo grafo é dada na figura 5.1:

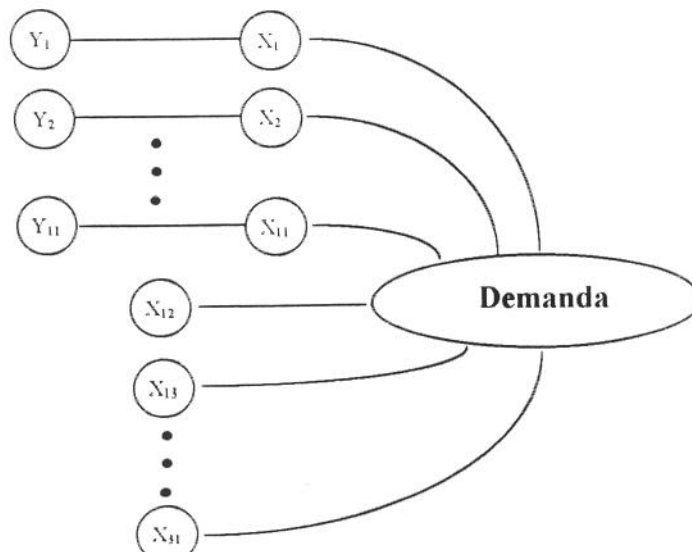


Figura 5.1 - Grafo do Problema de Expansão com as 31 alternativas

CAPÍTULO 6

RESULTADOS E CONCLUSÕES

6.1 - RESULTADOS

Aplicando-se o método STEM-Grafo ao problema do estudo de caso, obteve-se a tabela *Pay-Off* apresentada na tabela 6.1, bem como os valores de cada alternativa na tabela 6.2.

Tabela 6.1 - Tabela *Pay-Off* de Resultados

Solução	Objetivo			
	Área	Custo	Emissão	Energia Perdida
Ideal	1113,003	30395,768	0,919	2234,300
Área	1113,003	30849,825	10474,422	5500,250
Custo	2456,848	30395,768	10474,422	5472,300
Emissão	7459,247	47101,120	0,919	2234,300
Energia Perdida	7459,247	47078,860	1,689	2234,300

A diferença entre a 3 e a 4 solução da tabela 6.2 deve-se à troca da condensação parcial (alternativa 30 da tabela 6.2) pelo aumento da geração do gás natural (alternativa 25 da tabela 6.2), ver a tabela 5.1. Na verdade, as perdas energéticas das duas alternativas são iguais, mas devido ao custo econômico do gás natural ser menor, então, a alternativa do gás natural foi escolhida. Observe que na tabela 6.1 os valores do objetivo 4 obtidos nas soluções 3 e 4 são iguais.

Tabela 6.2 - Soluções Ótimas

Alternativa	Geração Máxima	Tipo	Solução			
			Área (km ²)	Custo (US\$ 10 ⁶)	Emissão (tSO ₂ /ano)	En. Perd. (MWmed.)
1	4675	H	0	0	4675	4675
2	393	H	393	393	393	393
3	669	H	669	669	669	669
4	344	H	0	0	344	344
5	318	H	318	0	318	318
6	877	H	0	877	877	877
7	755	H	755	755	755	755
8	425	T	425	425	0	0
9	425	T	425	425	0	0
10	425	T	425	425	0	0
11	425	T	425	425	0	0
12	225	H	0	0	225	225
13	145	H	0	0	145	145
14	323	H	323	0	323	323
15	275	H	275	275	275	275
16	103	H	103	0	103	103
17	228	H	228	115	228	228
18	270	H	270	270	270	270
19	102	H	20	0	102	102
20	237	H	0	0	237	237
21	560	T	560	560	0	0
22	1120	T	1120	1120	0	0
23	940	T	940	940	0	0
24	940	T	940	940	0	0
25	2160	T	2160	2160	835	1535
26	700	CO	700	700	700	700
27	700	CO	700	700	700	700
28	700	CO	700	700	700	700
29	400	CG	400	400	400	400
30	700	CG	700	700	700	0
31	850	CG	850	850	850	850
TOTAL	21409	--◇--	14824	14824	14824	14824

Nas tabelas 6.3 a 6.8 são apresentadas algumas simulações entre o programa computacional e os diversos tipos de decisores, sendo que em cada simulação tem-se a interação feita com um tipo de decisor.

Na Simulação 1 da tabela 6.3, o decisor escolheu inicialmente o objetivo área como o mais importante e minimizou-o na primeira interação. Diante dos resultados obtidos, por considerar muito elevado o valor do objetivo 3, o decisor decidiu minimizá-lo, relaxando o objetivo anterior até 2.000 m². Ou seja, desde que o objetivo 1 não seja superior a 2.000, o decisor se dá por satisfeito com qualquer solução.

Não satisfeito ainda com o valor do objetivo 4 (energia perdida) da na segunda interação, o decisor decidiu minimizá-lo, aceitando ceder o objetivo 3 até 9.000 ton.SO₂/ano. A nova solução obtida não apresentou, no entanto, nenhuma mudança. Se o valor do objetivo 2 satisfaz o decisor e não existe mais nenhuma possibilidade de obter um valor menor para o objetivo 4, dá-se por encontrada a solução de compromisso.

Tabela 6.3 - Simulação 1

Interação	1	2	3
Objetivo Otimizado	Área	Emissão	Energia Perdida
	(km²)	(tSO₂/ano)	(MW med.)
Valor Relaxado do		2000	9000
Objetivo Anterior			
Área	1.113,003	1.982,315	1.982,315
Custo	30.849,825	31.491,527	31.491,527
Emissão	10.474,422	8.363,078	8.363,078
Energia Perdida	5.500,250	5.395,876	5.395,876

Na simulação 2 da tabela 6.4, o decisor também priorizou o objetivo 1 (área alagada), mas por outro lado, o valor do custo foi considerado alto na primeira interação. Assim o objetivo custo é minimizado na segunda interação e o objetivo área, minimizado anteriormente, é relaxado até 2.500m².

Mesmo assim a solução obtida na segunda interação não satisfaz o decisor, pois o valor do terceiro objetivo (custo) foi considerado alto, então foi decidido relaxar o objetivo custo até US\$ 30.800 milhões, observe que este valor é menor do que a solução obtida na primeira interação, pois não teria sentido minimizar o objetivo custo na segunda interação se ele se contentasse com um valor maior do que foi obtido na primeira interação (US\$ 30.849,825 milhões).

Da mesma forma, partir da solução obtida na terceira interação, o objetivo 3 foi relaxado até 10.450 Mwmed (um valor menor do que tinha sido obtida na segunda interação,

10.474,422 MWmed. Na quarta interação, com todos os objetivos já otimizado, então a solução obtida é a solução de compromisso.

Tabela 6.4 - Simulação 2

Interação	1	2	3	4
Objetivo Otimizado	Área	Custo	Emissão	Energia Perdida
	(km²)	(US\$ 10⁶)	(tSO₂/ano)	(MW med.)
Valor Relaxado do		2500	30.800	10.450
Objetivo Anterior				
Área	1.113,003	1.471,380	1.488,287	1.488,287
Custo	30.849,825	30.760,548	30.776,035	30.776,035
Emissão	10.474,422	10.474,422	10.425,075	10.425,075
Energia Perdida	5.500,250	5.500,250	5.497,811	5.497,811

Na simulação 3 da tabela 6.5, o decisor também é favorável ao objetivo área, mas considera o objetivo energia perdida como o segundo mais importante. Como não se satisfaz com a solução obtida na primeira interação, resolveu minimizar o objetivo energia perdida e relaxar o objetivo área até 3.500 km². Satisfeito com a solução obtida na segunda interação a mesma passa a ser considerada a solução de compromisso.

Tabela 6.5 - Simulação 3

Interação	1	2
Objetivo Otimizado	Área	Energia Perdida
	(km²)	(MW med.)
Valor Relaxado do		3.500
Objetivo Anterior		
Área	1.113,003	3.388,333
Custo	30.849,825	32.520,467
Emissão	10.474,422	5.005,764
Energia Perdida	5.500,250	5.229,907

Na simulação 4 da tabela 6.6, o decisor resolveu otimizar primeiramente o objetivo custo. Não estando satisfeito com a quantidade de energia perdida resolveu minimizá-lo na segunda interação com a relaxação do objetivo custo até US\$ 35.000 milhões.

Na terceira interação, não satisfeito ainda com o valor obtido para a área, o decisor resolveu otimizar o objetivo área e relaxar o objetivo 4 (energia perdida) até 5.200 MWmed, observe que não seria conveniente relaxar o objetivo 4 por mais ou igual a 5.472,300

ton.SO₂/ano, valor do objetivo na primeira interação. Estanto, o decisor satisfeito com a solução da terceira interação, então a mesma passa a ser considerada a solução de compromisso.

Tabela 6.6 - Simulação 4

Interação	1	2	3
Objetivo Otimizado	Custo	Energia Perdida	Área
	(US\$ 10 ⁶)	(MW med.)	(km ²)
Valor Relaxado do Objetivo Anterior		35.000	5.200
Área	2.456,848	4.476,380	4.343,168
Custo	30.395,768	32.142,706	31.987,088
Emissão	10.474,422	10.120,303	10.130,541
Energia Perdida	5.472,300	5.121,964	5.132,093

Na simulação 5 da tabela 6.7, o objetivo custo é considerado pelo decisor como o mais importante, com isso foi obtido a solução dada na primeira interação. Não satisfeito com o valor do objetivo 1 (área) desta solução, o decisor resolveu minimizá-lo com a relaxação da emissão até 5.000 ton.SO₂/ano. Ainda assim, o decisor não conteve-se com o valor obtido do custo na segunda interação, ele resolveu minimizar este objetivo e relaxar o objetivo minimizado (custo) anteriormente até 5.000 m². Como a solução da terceira interação foi considerada satisfatória pelo decisor, logo ela é a solução de compromisso.

Tabela 6.7 - Simulação 5

Interação	1	2	3
Objetivo Otimizado	Emissão	Área	Custo
	(tSO ₂ /ano)	(km ²)	(US\$ 10 ⁶)
Valor Relaxado do Objetivo Anterior		5.000	5.000
Área	7.459,247	4.429,500	3.932,393
Custo	47.101,120	44.585,468	43.000,254
Emissão	0,919	6.253,389	6.254,291
Energia Perdida	2.234,300	2.627,982	3.195,102

Na simulação 6 da tabela 6.8, o decisor atribui maior importância ao objetivo energia perdida, com isso foi obtida a primeira solução eficiente com a minimização de energia perdida. Descontente com o valor obtido do objetivo 3 (emissão) na primeira interação, o decisor resolve otimizá-lo e relaxar (ceder) o objetivo otimizado anteriormente até 6.000

MWmed.. Ainda não satisfeito com o valor obtido do objetivo 2 (custo) na segunda interação, então ele decidiu aceitar um valor menor ou igual a 1,6 ton.SO₂/ano para que possa melhorar o objetivo de custo. A nova solução obtida, considerada satisfatória pelo decisor, então ela é a solução de compromisso.

Tabela 6.8 - Simulação 6

Interação	1	2	3
Objetivo Otimizado	Energia Perdida	Emissão	Custo
	(MW med.)	(tSO ₂ /ano)	(US\$ 10 ⁶)
Valor Relaxado do Objetivo Anterior		6.000	2
Área	7.459,247	7.459,247	7.458,858
Custo	47.078,860	47.101,120	47.100,697
Emissão	1,689	0,919	1,600
Energia Perdida	2.234,300	2.234,300	2.234,342

6.2 - CONCLUSÕES

Fazendo uma análise inicial da tabela 6.1, pode-se perceber que os objetivos 1 e 2 (área alagada e custo econômico) se correlacionam, o mesmo acontece como os objetivos 3 e 4 (emissão de SO₂ e perdas energéticas), por serem semelhantes as soluções obtidas. Logo, aquelas alternativas que alagam menos são de certa forma as mais econômicas e aquelas que emitem menos poluentes são aquelas que têm menores perdas energéticas.

Por outro lado, os objetivos área e custo entram em conflito em algum ponto da região factível, como nas duas primeiras interações da segunda simulação, onde depois de obter o ótimo da área alagada, resolveu-se relaxá-lo até 2500 km² e minimizar o custo econômico. Como não houve mudança nos valores dos objetivos 3 e 4 e sim aumento da área alagada e diminuição do custo econômico, ou seja, existência de conflitos entre os objetivos 1 e 2 nesta região com a substituição de 358,377 km² por 89,277 milhões de US\$ (uma média de US\$ 249 mil por km²).

O conflito entre os objetivos 3 e 4 já é menos evidente, pois nas interações 2 e 3 da 1ª simulação e nas interações 3 e 4 da 2ª simulação não houve modificações nos resultados. Nas interações 1 e 2 da simulação 6, tem-se uma situação de conflito entre os dois objetivos, mas não houve mudança no objetivo 4 e sim, a troca de 770 kg de emissão de SO₂ por 22,26 milhões de US\$.

Na última simulação, a hierarquia dos objetivos segue a seguinte ordem: energia perdida, emissão de poluente e custo econômico, o que gerou resultados bastante favoráveis

às hidrelétricas, apesar da relaxação imposta na segunda interação, isto significa que a hierarquia dos objetivos adotada na tomada de decisão influencia fortemente nos resultados.

Talvez o resultado que pareça mais razoável em comparação com a solução ideal seja a solução da segunda interação da terceira simulação, pois os três primeiros objetivos apresentaram um resultado bastante mediano, exceto o quarto objetivo que ficou um pouco alto.

Um questão importante que deve ser ressaltado é o uso inevitável dos recursos ambientais, o grande dilema é decidir quanto de recursos monetários devem ser gastos em troca de quais recursos ambientais e até que nível essa troca é vantajosa.

Uma característica predominante no programa é a ordem da hierarquia dos objetivos, pois aquele objetivo que possuir maior hierarquia terá maior influência nos resultados, até a última interação, exceto nos casos onde o objetivo é relaxado excessivamente na próxima interação. Nas três primeiras simulações teve-se o objetivo 1 na posição mais alta da hierarquia e obteve-se valores menores que 3500 km^2 e nas últimas três, em que o objetivo 1 não estava na posição mais alta e os seus valores obtidos foram maiores que 3900 km^2 .

Deve-se observar que os resultados obtidos dependem da origem da base de dado, se a base de dado for tendencioso então os obtido irá seguir essa tendência. Por exemplo, se a previsão de consumo for otimista (previsão de um consumo exagerado), então o algoritmo irá gerar resultados que tende aumentar o parque de geração exageradamente.

ANEXO 1

PROGRAMAÇÃO LINEAR

Esta técnica foi um grande marco no desenvolvimento da pesquisa operacional. Em 1947, G. Dantzig publicou o método SIMPLEX que resolve a otimização de problemas lineares, com isso nasceu a Programação Linear (PL).

A formulação matricial do PL é:

$$\begin{aligned} \min \quad & z = \mathbf{c}^T \mathbf{x} \\ \text{s.a.} \quad & \mathbf{A} \mathbf{x} \geq \mathbf{b} \\ & \mathbf{x} \geq \mathbf{0} \end{aligned} \tag{a1.1}$$

A1.1 - MÉTODO SIMPLEX

O método simplex se baseia na busca da solução ótima de acordo com a função objetiva, a partir de um subconjunto dos pontos extremos do conjunto convexo das soluções factíveis (**S**) formado pelas restrições.

O método particiona os vetores **c**, **x** e a matriz **A** como indicado em (a1.2), onde **B** corresponde às colunas básicas e **N** às não básica. Lembrando que **B**⁻¹ deve existir.

$$\mathbf{A} = [\mathbf{B} \quad \mathbf{N}], \mathbf{c} = [\mathbf{c}_B \quad \mathbf{c}_N] \text{ e } \mathbf{x} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_B \\ \mathbf{x}_N \end{bmatrix} \tag{a1.2}$$

Resultando no seguinte formato para (a1.1):

$$\begin{aligned} \min \quad & z = \mathbf{c}_B^T \mathbf{x}_B + \mathbf{c}_N^T \mathbf{x}_N \\ \text{s.a.} \quad & \mathbf{B} \mathbf{x}_B + \mathbf{N} \mathbf{x}_N = \mathbf{b} \\ & \begin{pmatrix} \mathbf{x}_B \\ \mathbf{x}_N \end{pmatrix} \geq \mathbf{0} \end{aligned} \tag{a1.3}$$

Considerando a existência da matriz **B**⁻¹ e as restrições do (a1.3), tem-se a seguinte equivalência:

$$\mathbf{B} \mathbf{x}_B + \mathbf{N} \mathbf{x}_N = \mathbf{b} \Rightarrow \mathbf{x}_B = \mathbf{B}^{-1} \mathbf{b} - \mathbf{B}^{-1} \mathbf{N} \mathbf{x}_N \tag{a1.4}$$

O próximo passo do método é encontrar uma solução inicial básica factível. Como uma solução básica implica em $\mathbf{x}_N = \mathbf{0}$ e uma solução factível implica em $\mathbf{x}_B \geq \mathbf{0}$, então tem-se:

$$\left. \begin{array}{l} \text{sol. básica} \quad \mathbf{x}_N = \mathbf{0} \\ \text{sol. factível} \quad \mathbf{x}_B \geq \mathbf{0} \end{array} \right\} \Rightarrow \mathbf{x}_B = \mathbf{B}^{-1} \mathbf{b} - \mathbf{B}^{-1} \mathbf{N} \mathbf{x}_N$$

$$\Rightarrow \mathbf{x}_B = \mathbf{B}^{-1} \mathbf{b}$$
(a1.5)

Para testar a otimalidade da solução $\mathbf{x}_B$, utiliza-se o custo relativo ($\mathbf{c}_r$). O custo relativo significa a taxa marginal de variação do z pela entrada de uma determinada variável não-básica na base.

Pelo objetivo do problema (a1.3) e do item (a1.4) tem-se, respectivamente:

$$\left\{ \begin{array}{l} z = \mathbf{c}_B \mathbf{x}_B + \mathbf{c}_N \mathbf{x}_N \\ \mathbf{x}_B = \mathbf{B}^{-1} \mathbf{b} - \mathbf{B}^{-1} \mathbf{N} \mathbf{x}_N \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \text{(a1.6)} \\ \text{(a1.7)} \end{array}$$

Substituindo-se o $\mathbf{x}_B$ do (a1.7) no (a1.6) é obtido:

$$z = \mathbf{c}_B^T \mathbf{B}^{-1} \mathbf{b} + \underbrace{(\mathbf{c}_N^T - \mathbf{c}_B^T \mathbf{B}^{-1} \mathbf{N})}_{\text{custo relativo } (\mathbf{c}_r)} \mathbf{x}_N \quad \text{(a1.8)}$$

Para o caso de minimização aqui considerado, se $\mathbf{c}_r \geq \mathbf{0}$ então $\mathbf{x}_B$ é a solução ótima, pois se $\mathbf{c}_r \geq \mathbf{0}$ então qualquer elemento de $\mathbf{x}_N$ que entrar na base irá aumentar o valor de z , contrariando o objetivo de minimização.

Como existe pelo menos um $\mathbf{c}_{r,i} < 0$, então aquele que for menor terá a sua variável não básica x_i dentro da base, pois este será aquela variável que reduzirá mais o valor da função objetivo.

Para encontrar a variável que deverá sair da base deve-se calcular um bloqueio que não permitirá qualquer x_i entrar na base com valor negativo.

Esse bloqueio é calculado da seguinte forma:

$$\frac{y_{j0}}{y_{jq}} = \min \left\{ \frac{y_{i0}}{y_{iq}} \right\} \quad \text{tal que } y_{iq} > 0 \quad \text{(a1.9)}$$

Os índices i 's são as variáveis que não estão na base e j é a variável de onde ocorreu o mínimo, portanto será a variável que entrará na base. No caso da ocorrência do $y_{i0} \leq 0$, então a região factível é não limitada.

Finalmente deve-se atualizar a matriz $\mathbf{B}$ e substituir a antiga solução básica pela nova $\mathbf{x}_B = \mathbf{B}^{-1} \mathbf{b}$ e iniciar uma nova interação com o teste da otimalidade.

O método Simplex resolve basicamente quatro sistemas de equação:

$$\begin{cases} \mathbf{y}_{i0} = \mathbf{B}^{-1}\mathbf{b} \Leftrightarrow \mathbf{B}\mathbf{y}_{i0} = \mathbf{b} \end{cases} \quad (\text{a1.10})$$

$$\begin{cases} \mathbf{y}_{iq} = \mathbf{B}^{-1}\mathbf{a}_q \Leftrightarrow \mathbf{B}\mathbf{y}_{iq} = \mathbf{a}_q \end{cases} \quad (\text{a1.11})$$

$$\begin{cases} \boldsymbol{\lambda} = \mathbf{B}^{-1}\mathbf{c}_B \Leftrightarrow \mathbf{B}\boldsymbol{\lambda} = \mathbf{c}_B \end{cases} \quad (\text{a1.12})$$

$$\begin{cases} \mathbf{x}_B = \mathbf{B}^{-1}\mathbf{b} \Leftrightarrow \mathbf{B}\mathbf{x}_B = \mathbf{b} \end{cases} \quad (\text{a1.13})$$

O vetor $\mathbf{a}_q$ é a coluna da variável básica que deverá sair da base e λ é custo reduzido, um elemento utilizado no cálculo do custo relativo ($\mathbf{c}_r^T = \mathbf{c}_N^T - \mathbf{c}_B^T \mathbf{B}^{-1} \mathbf{N} = \mathbf{c}_N^T - \lambda \mathbf{N}$).

A busca de solução do método Simplex pode ser resumida em 4 passos:

- **passo 1** : determine uma solução factível inicial;
- **passo 2** : calcula os atuais coeficientes do custo relativo $\mathbf{c}_r^T = \mathbf{c}_N^T - \mathbf{c}_B^T \mathbf{B}^{-1} \mathbf{N}$. Se $\mathbf{c}_r^T \geq 0$ então a solução básica é ótima, ou seja, $\mathbf{x}^* = \mathbf{x}_B = \mathbf{B}^{-1}\mathbf{b}$;
- **passo 3** : determine qual vetor $\mathbf{a}_q$ que deve entrar na base, selecione aquele que tiver o coeficiente de custo mais negativo e calcule $\mathbf{y}_{iq} = \mathbf{B}^{-1}\mathbf{a}_q$ a qual é obtida o vetor $\mathbf{a}_q$ que expressa a base atual;
- **passo 4** : se não existe $\mathbf{y}_{iq} > 0$ então o problema é não contornado, senão calcule o coeficiente $\mathbf{y}_{i0} / \mathbf{y}_{iq}$ para $\mathbf{y}_{iq} > 0$ para determinar qual vetor da atual base deve sair;
- **passo 5** : atualize a base $\mathbf{B}^{-1}$ e retorne ao passo 2.

Nos pacotes computacionais são utilizadas técnicas mais eficientes como a decomposição LU, que tem a vantagem de aproveitar a simplicidade das operações com as matrizes triangulares. Neste caso $\mathbf{B} = \mathbf{LU}$, onde $\mathbf{L}$ é uma matriz triangular inferior e $\mathbf{U}$ é um triangular superior.

Maiores informações da programação linear pode ser encontrada no Luenberger (1984).

ANEXO 2

PROGRAMAÇÃO INTEIRA MISTA

Nos casos dos modelos de planejamento de expansão de sistemas energéticos e dos modelos de orçamento de capital, as unidades de produção de energia e os projetos de investimentos não podem ser fracionados.

A Programação Inteira Mista (PIM) é uma técnica de programação matemática que resolve modelos constituídos de variáveis de decisão inteira ou não. Nos casos onde o problema é constituído somente por variáveis inteiras ($y \in \mathbb{Z}^k$), a técnica é chamada de Programação Inteira (PI).

A formulação do PIM linear é:

$$\begin{aligned} \min \quad & \mathbf{c} \mathbf{x} + \mathbf{e} \mathbf{y} \\ \text{s.a} \quad & \mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{D} \mathbf{y} \geq \mathbf{b} \\ & \mathbf{x} \geq \mathbf{0}, \mathbf{y} \geq \mathbf{0} \\ & \mathbf{y} \in \mathbb{Z}^k \end{aligned} \tag{a2.1}$$

E quando houver somente variáveis booleanas ($y \in \mathbb{B}^k$), é chamado de programação zero-um.

Existem atualmente quatro técnicas principais para a resolução de problemas de PIM, eles são: método de enumeração implícito, plano de corte, algoritmos de partição e relaxação Lagrangeana.

Como o objetivo deste trabalho não reside na PIM, então será dado maior ênfase somente aos métodos de enumeração implícita, mais conhecida como o algoritmo de *Branch & Bound* (B&B).

O princípio do algoritmo do B&B é a fixação dos valores das variáveis inteiras (y), transformando o problema de programação inteira-mista em linear, onde a tarefa do B&B é gerenciar a busca da solução ótima com o menor número de interações possíveis, ou seja, a cada interação é fixado um conjunto de valores para as variáveis inteiras.

Com a fixação das variáveis inteiras o problema a2.1 será reduzida a a2.2.

$$\min \quad \mathbf{c} \mathbf{x} + \mathbf{d}$$

$$\begin{aligned} \text{s.a } A x &\geq b - D y \\ x &\geq 0 \end{aligned} \tag{a2.2}$$

Para uma enumeração explícita tem-se $(2^N - 1)$ interações, onde N é o número de variáveis inteiras. Por outro lado, com a interferência do B&B o número de interações serão reduzidas.

A2.1 - MÉTODOS DE ENUMERAÇÃO IMPLÍCITA: BRANCH & BOUND

Em 1966, A. Land e A. Doig apresentaram um algoritmo de enumeração para a resolução do problema do caixeiro viajante, que resultou no algoritmo de Thompson intitulado “*The Stopped Simplex Method*”. Um ano mais tarde, Dakin propôs uma variação do algoritmo de Land e Doig, onde são gerados dois ramos em cada nó. Também no mesmo ano Beale e Small propuseram o uso de pós-otimização no algoritmo de Dakin.

Em 1968, Driebeek apresentou um algoritmo de enumeração implícita usando a programação binária e pós-otimização, a qual foi implementado mais tarde por Shreshian e Spielberg. A enumeração implícita também foi tratada e implementada por Geoffrion e Balas, usando Relaxação Lagrangeana.

Nas formulações de programação inteira o conjunto de soluções factíveis S sofre uma forte discretização, tornando o número de elementos do conjunto S finito. Neste caso as variáveis inteiras tem um limite superior l_{s_i} , supondo que existam n variáveis então o número de elemento do conjunto S é $\prod_{i=1}^n (l_{s_i} + 1)$ se todas as variáveis inteiras não são negativas.

O método enumerativo procura enumerar, de modo implícito, todos os elementos do conjunto S , mas é impossível enumerar todos quando o n (número de variáveis) for muito grande. Neste caso, será analisado somente um subconjunto de elemento de S , através das indicações fornecidas pelas restrições, tais técnicas são conhecidas como enumeração implícita.

O método *Branch and Bound* é uma dessas técnica de enumeração implícita e seu princípio básico de funcionamento é apoiado numa estrutura de árvore, onde o método ramifica (*branch*) os nós delimitando ou partindo (*bound*) o conjunto factível em dois, como o próprio significado do método.

A árvore de enumeração procura representar o procedimento de busca das soluções, onde cada nó representa um problema linear, que neste trabalho é um grafo conservativo.

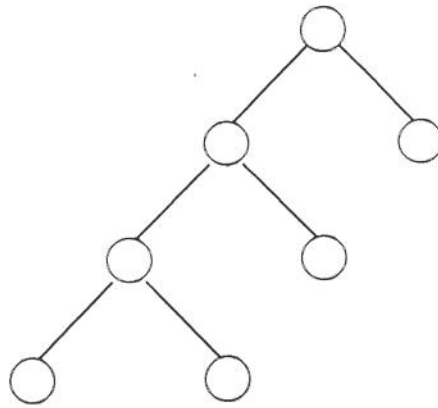


Figura a2.1 - Branch do B&B

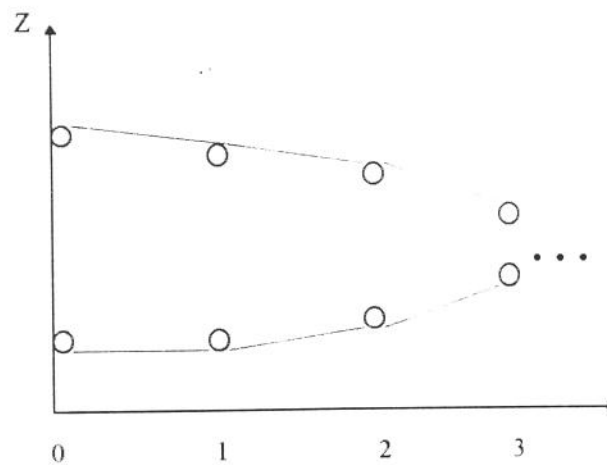


Figura a2.2 - Bound do B&B

Existem três tipos principais de busca de soluções na árvore: profundidade, amplitude (largura) e heurística, veja as figuras a2.3 e a2.4. Entre as três técnicas, a busca em profundidade apresenta-se como a mais promissora para a nossa aplicação, pois ela procura sondar todos os nós do mesmo ramo e conseqüentemente a torna simples e consumidora de pouca memória; o mesmo não acontece com outras técnicas que necessitam de pular de ramo em ramo toda vez que for sondar um novo nó.

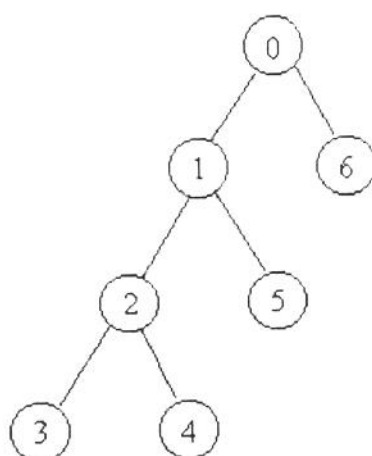


Figura a2.3 Busca em Profundidade

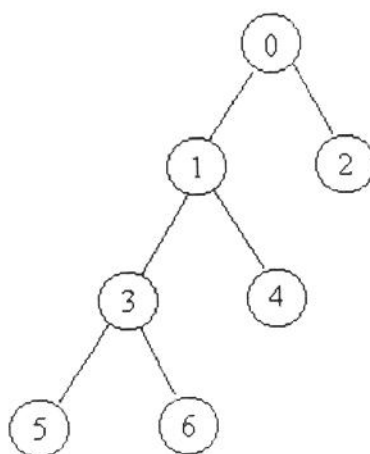


Figura a2.4 Busca em Amplitude

Inicialmente, B&B define dois conjuntos factíveis:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{T} &= \{ \mathbf{x} | \mathbf{Ax} = \mathbf{b}, \mathbf{x} \in \mathbf{R}^n \} \\ \mathbf{S} &= \{ \mathbf{x} | \mathbf{Ax} = \mathbf{b}, \mathbf{x} \in \mathbf{R}^n \} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \mathbf{T} \subseteq \mathbf{S} \quad (\text{a2.3})$$

onde $\mathbf{T}$: conjunto das soluções factíveis;
 $\mathbf{S}$: conjunto das soluções factíveis inteiras.

Portanto tem-se dois problemas de otimização:

$$\min \{ \mathbf{cx} \mid \mathbf{x} \in \mathbf{T} \} \quad \text{PIM} \quad (\text{a2.4})$$

$$\min \{ \mathbf{cx} \mid \mathbf{x} \in \mathbf{S} \} \quad \text{PL (problema relaxado)} \quad (\text{a2.5})$$

Primeiramente, o algoritmo B&B resolve o problema relaxando a integridade do PL, se a solução for inteira, então a solução encontrada é ótima, senão são estabelecidos os limitantes superior e inferior do PIM a partir da solução obtida para a divisão do problema (nó) em dois.

De modo que a união do conjunto das soluções factíveis de cada nó gerado seja igual ao nó pai ($T_1 \cup T_2 = T$) e suas intersecções sejam, se possível, vazias ($T_1 \cap T_2 = \emptyset$).

O conjunto de solução factível será formado pelo acréscimo de uma restrição (no S original) com a variável não inteira considerada menor ou igual a sua parte inteira e maior ou igual a variável não inteira considerada mais um para T_1 e T_2 , respectivamente.

A avaliação de cada nó gera três possíveis resultados. No caso de minimização, estes serão:

- a solução não satisfaz as variáveis inteiras e é menor que o limitante superior, então faz-se um novo *branch* no nó, caso a solução seja maior, então o nó foi sondado e *backtracking* (o nó corrente passa a ser o nó pai corrente);
- a solução satisfaz as variáveis inteiras e é menor que o limitante superior, então o nó foi sondado e substitui-se o limitante superior pela solução do nó, caso a solução seja maior que o limitante então apenas sonda-se o nó;
- não existe solução factível no nó, então o nó foi sondado;

Um nó é considerado sondado quando:

- for encontrada uma solução que satisfaça às restrições de integridade;
- não existe solução factível no nó;
- a solução encontrada é menor que o limite inferior para os problemas de maximização ou maior que o limite superior para os problemas de minimização;
- seus descendentes já foram sondados.

Repetindo esse processo de sondagem recursivamente chega-se a solução quando o limitante superior for igual ao limitante inferior ou o nó 0 (nó inicial) for sondado, isto é, tendo-se chegado a enumeração implícita de todas as soluções do PIM. Um caso especial ocorre quando se encontra uma solução satisfatória no nó 0, isto é, a solução do problema relaxado é inteira.

Maiores informações da teoria da Programação Inteira-Mista podem ser encontradas no Garfinkel & Newhauser (1972).

ANEXO 3

GRAFO CONSERVATIVO

Um grafo é formado por um conjunto de nós que estão ligados entre si por arcos, onde cada arco representa o fluxo de um nó para outro. Os modelos de grafo conservativo (GC) determinam a quantidade de fluxo de cada arco do grafo de modo que otimize o uso dos recursos considerados.

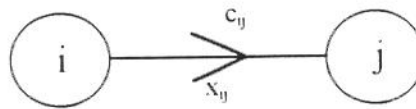


Figura a3.1 - Componente de Ligação do Sistema Arco-Nó

Os modelos de GC têm a seguinte formulação matemática:

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{i_s} \sum_{i_e} c_{i_s, i_e} x_{i_s, i_e} \\ \text{s. a.} \quad & \sum_{i_s} x_{i_s, i} - \sum_{i_e} x_{i, i_e} = b_i, \quad i \in I, x_{ij} \geq 0 \end{aligned}$$

onde x_{ij} : fluxo de cada arco
 c_{ij} : custo unitário do fluxo de cada arco
 I : conjunto de nós
 I_e : conjunto de nós que tem fluxo entrando no nó
 I_s : conjunto de nós que tem fluxo saindo no nó
 b_i : fluxo líquido do nó i

Os coeficientes da matriz de restrição, na formulação acima, formam a matriz de incidência arco-nó ^{a3.1}.

A maior vantagem do algoritmo de grafo conservativo é a velocidade em que resolve um problema de PL que tenha a estrutura de grafo, neste caso sua velocidade é 100 a 150 vezes mais rápida, segundo Correia (1988).

^{a3.1} a matriz de incidência arco-nó é a matriz onde cada linha está associada a um nó e cada coluna está associada a um arco.

A representação de um grafo é feita por $\mathcal{G}[I,K]$, onde I e K são conjuntos de nós e arcos, respectivamente e $k = (i_s, i_c) \in K$, tem-se um arco com origem no nó i_s e destino no nó i_c , ou seja, o fluxo sai do nó i_s e chega ao nó i_c .

Pode-se identificar no grafo da figura 3.2, os números em negrito são as identificações de cada arcos e os não negritos são os custos, sendo que o primeiro é custo variável (c) e o segundo é custo fixo (c_f).

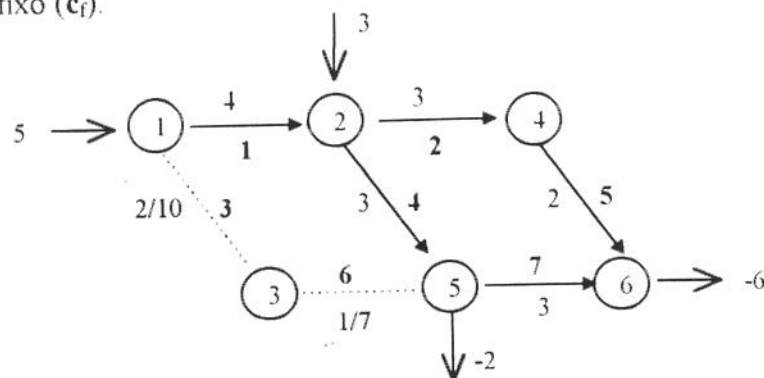


Figura a3.2: Grafo

O grafo dado na figura a3.2 tem a seguinte matriz incidência dada na figura a3.3:

n\e	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	0	0	0	0	0
2	-1	0	1	1	0	0	0
3	0	-1	0	0	1	0	0
4	0	0	-1	0	0	1	0
5	0	0	0	-1	-1	0	1
6	0	0	0	0	0	-1	-1

Figura a3.3: Matriz de Incidência

A característica principal do grafo conservativo (GC) é o formato básico da matriz de incidência (mostrada na figura a3.3) que tem todas as suas colunas com um elemento -1, outro 1 e os demais nulos e a conservação do fluxo ao longo dos arcos.

Os dados iniciais do grafo procuram descrever as características de todos os nós e arcos. Esses dados são: arco de origem e destino, limite inferior e superior do fluxo e custo variável e fixo de cada arco. Para o grafo da figura a3.2, tem-se os dados apresentados na tabela a3.1.

Tabela a3.1 - Representação dos arcos do grafo

	o	d	li	ls	cv
1	1	2	0	8	4
2	2	4	0	8	3
3	1	3	0	8	2
4	2	5	0	8	3
5	4	6	0	8	2
6	3	5	0	8	1
7	5	6	0	8	3

A busca de solução pelo GC pode ser resumida em 8 passos:

- **passo 1** : no primeiro passo obtém-se a solução factível inicial através da conhecida fase I ou BIG-M;
- **passo 2** : calcula-se as variáveis duais (potencial) tomando um determinado nó como referência através da seguinte equação:

$$c_{f_{is}, i_e} = c_{i_s, i_e} - (\rho_{i_s} - \rho_{i_e}) \quad \text{a3.1}$$
- **passo 3** : é determinado o potencial do nó de referência como nulo, calcula-se o potencial de outros nós a partir da equação a3.2:

$$c_{i_s, i_e} = (\rho_{i_s} - \rho_{i_e}) \quad \text{a3.2}$$
- **passo 4** : a partir do potencial de cada nó e do custo do fluxo é determina-se o custo relativo de cada arco que não pertence a base com a equação a3.1;
- **passo 5** : neste passo faz-se o teste de otimalidade da solução atual, se não existe um custo relativo negativo que não pertença a base então a solução ótima foi encontrada caso contrário continua no próximo passo;
- **passo 6** : o arco que não pertence à base que tiver menor custo relativo será o arco que entrará na base;
- **passo 7** : define-se o fluxo máximo do arco que entra na base e consequentemente o arco que sairá da base;
- **passo 8** : faz-se a atualização da base e retorna-se ao passo 2.

Na tabela a3.2, são apresentadas as correspondências entre os passos do simplex descritos no anexo 1 e os passos do GC descritos no parágrafo anterior.

Tabela A3.2 - Correspondência entre os passos do simplex e do GC

	Simplex	GC
Passos	1	1
	2	2 a 5
	3	6
	4	7
	5	8

A vantagem do GC torna visível quando são resolvidos os sistemas de equação a1.10 a a1.13. Pois a matriz básica **B** é uma matriz triangular, portanto a resolução dos sistemas de equações não necessitam passar pela 2ª fase do método de Gauss. Além disso, a esparsidade particular da matriz **B** permite a atualização da base através de índices, tornando-a mais fácil.

Maiores detalhes de GC podem ser encontrado no Bazaraa (1990) e Correia (1988), onde o segundo trata principalmente a integração do GC com B&B e o seu algoritmo computacional.

ANEXO 4

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- Amagai & Leung, 1990 : AMAGAI, Hisashi e LEUNG, PingSun. **"The Trade-Off between Economic and Environmental Objective in Japan's Power Sector"**. The Energy Jornal, vol.12, nº3, 1990.
- Balestieri, 1994 : BALESTIERI, José A. P., **"Síntese Otimizada de Sistema de Cogeração"** - Tese de doutorado defendida no departamento de energia da faculdade de engenharia mecânica da UNICAMP, 1994.
- Barth *et alli*, 1987 : BARTH, Flávio T., POMPEU, Cid T., FILL, Heinz D. e outros - **"Modelos para Gerenciamento de Recursos Hídricos"**. Coleção ABRH de recursos hídricos, Ed. Nobel/ABRH, p.27-48, 1987.
- Bazaraa *et alli*, 1990 : BAZARAA, Mokhtar S., JARVIS, John J. e SHERALI, Hanif D. - **"Linear Programming and Network Flows"**, John Wiley & Sons Inc., 2ª edição, p.684, 1990.
- Benayoun *et alli*, 1971 : BENAYOUN, R. J., MONTGOLFIER, J., TERGNY, J. e LARITCHEV, O. **"Linear programming with Multiple Objective Functions: Step method (STEM)"**, Mathematica Programming, vol.1, nº3, p.366-375.
- Carnevalli & Suárez, 1993 : CARNEVALLI, Daniel e SUÁREZ, Carlos - **"Electricity and the Environment : air pollutant emissions in Argentina"** - Energy Policy, vol.121, nº1, p.68-72, 1993.
- Campodórico *et alli*, 1989 : CAMPODÓRICO M. N., GORENSTEIN G. B. e COSTA, J. P. - **"Expansão de Capacidade de um Sistema Hidrotérmico: modelo a usinas individualizada"** - X Simpósio Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 1989.
- Chankong & Haimes, 1983 : CHANKONG, Vira e HAIMES, Yacov Y., **"Multiobjective Decision Making"** - Serie in system science and engineering, North Holland, nº8, p.406, 1983.
- Chan & Correia, 1994 : CHAN, Chiu Yuen & CORREIA, Paulo de B., **"Método dos Pesos na Análise da Expansão do Sistema Hidrotérmico"**, II Congresso Brasileiro de Planejamento Energético, 1994.
- Correia, 1988 : CORREIA, Paulo de B., **"Um Modelo Multisetorial para Otimização do Suprimento de Energia : eletricidade, gás natural e cogeração com biomassa"** - Tese de doutorado defendida na Faculdade de Engenharia Elétrica da UNICAMP, 1988.
- Eletrobras, 1990 : ELETROBRÁS, **"DESELP - Desenvolvimento do Setor Elétrico a Longo Prazo"**, 1990.

- Elektrobras, 1993 : ELETROBRÁS. **"Plano Decenal de Expansão (1994-2003)"**. GCPS/Elektrobras. dez/1993.
- Elektrobras, 1994 : ELETROBRÁS. **"Plano 2015 : diversos projetos"**. 1994.
- Elektrobras, 1995 : ELETROBRÁS. **"Balanço Energético Nacional"**. 1995.
- Eletronorte, 1988 : ELETRONORTE. **"Memória do Empreendimento, Usina Hidrelétrica Tucuruí"** Eletronorte (Diretoria Técnica). vol.1. cap. 1 e 2. 1988.
- El-Wakil 1991 : El-Wakil, M. M., **"Power Technology"**. McGraw-Hill Book Company.
- Ende, 1990 : ENDE. **"Bolivia Plan Nacional de Electrification 1990-2010"**. 1990.
- Ennes, 1993 : ENNES, Sérgio A. W. - **"Estudo de Competividade de um Parque Termelétrico a Gás Natural em São Paulo"**. São Paulo : IT_EPG/016 - Companhia Energética de São Paulo, 1993.
- Ennes, 1994 : Ennes, Sérgio A. W., Correia, Paulo de Barros e Chan, Chiu Yuen - **"Análise da Expansão da Oferta de Energia Elétrica - uma abordagem multi-objetivo dos parâmetros ambientais"**. 10º Congresso Brasileiro de Automática, Rio de Janeiro, 1994.
- Fainzilber, 1983 : FAINZILBER, Abrahão - **"Energia Hidrelétrica"**, Série Biblioteca Educação Nacional. Bloch Editores S.A., vol.4, 1983.
- Fortunato *et alli*, 1990 : FORTUNATO, Luiz A., ARARIPE Neto, Tristão de A., PEREIRA, Mário V. F. e ALBUQUERQUE, João C. R. de. **"Introdução ao Planejamento de Expansão e Operação de Sistema de Produção de Energia Elétrica"**. Ed. Universidade Federal Fluminense. p.232, 1990.
- França, 1992 : FRANÇA, Júnia L., **"Manual para Normalização da Publicações"**, ed. UFMG, 2ª edição, p.196, 1992.
- Garfinkel & Newhauser, 1972 : GARFINKEL, Robert S. e NEMHAUSER, George L., **"Integer Programming"**, John Wiley & Sons Inc., 1972.
- Gazeta, 1995 : Jornal Gazeta Mercantil, **"Relatório sobre Conservação de Energia"**. edição do dia 02-maio-95, pp. 1-8.
- Gas, 1995 : Gas Turbine World **"1995 HandBook"**, Pequot Publishing Inc., vol.16, 1995.
- Geoffrion, 1968 : GEOFFRION, A. M. **"Proper Efficiency and the Theory of Vector Maximization"**, Journal of Mathematical Analysis and Optimization, nº22, 618-630.
- Geoffrion *et alli*, 1972 : GEOFFRION, A. M., DYER, J. S. e FAINBERG, A., **"An Interactive Approach for Multicriterion Optimization with an Application to the Operation of an Academic Department"**, Management Science, vol.19, nº4, p.357-368, 1972.
- Goicoechea *et alli*, 1982 : GOICOECHEA, Ambrose, HANSEN, Don R. e DUCKSTEIN, Lucien, **"Multipleobjective Decision Analysis with Enginnering and Business Applications"**, John Wiley & Sons, 1982.
- Gomes, 1994 : GOMES, Iêda Correia, **"Preço do Gás Natural Boliviano: a ótica do mercado"**, II Congresso Brasileiro de Planejamento Energético, 1994.

- Huylenbroeck, 1995 : HUYLENBROECK, G. van. **"The Conflict Analysis Method : bridging the gap between ELECTRE, PROMETHEE and ORESTE"**. European Journal of Operational Research, North-Holland, vol.1995, nº3, p.490-502, 1995.
- Hwang, 1993 : HWANG, Ching L., LAI, Young J. e LIU, Ting Y., **"A New Approach for Multiple Objective Decision Making"**, Computer Operation Research, Pergamon Press, vol.20, nº8 e p.889-899, 1993.
- Ijiri, 1965 : IJIRY, Y. **"Management Goal and Accounting for Control"** . North-Holland, Amsterdam, 1965.
- Kim & Ahn, 1993 : KIM, Young-Chang e AHN, Byong-Hun **"Multicriteria Generation-Expansion with Global Environment Considerations"** - IEEE Transactions on Engineering Management, vol.40, nº2, 1993.
- Kok, 1987 : KOK, Matthijs - **"Energy Modelling with Multiple Objectives and Multiple Actors"** - Energy Systems and Policy, Taylor & Francis Ltda., vol.10, nº1, p.21-40, 1987.
- Koopmans, 1951 : KOOPMANS, T. C., **"Analysis of production as an efficient combination of allocation"** - John Wiley & Sons, New York, p.33-37, 1951.
- Kuhn & Tucker, 1951 : KUHN, H. W. e TUCKER, A. W., **"Nonlinear Programming"** - Proceedings of the second Berkeley Symposium on mathematical statistics and probability, ed. Neyman, J., University of California Press, Berkeley, p.481-491, 1951.
- Luenberger, 1984 : LUENBERGER, David G., **"Linear and Nonlinear Programming"**, Addison-Wesley Publishing Company, 1984.
- Marglin, 1967 : MARGLIN, S. A. **"Public Investment Criteria"** - M.I.T. Press, Cambridge, Massachusetts, 1967.
- OECD, 1985 : Organization for Economic Co-operation and Development (OECD) - **"Environmental Effects of Electricity Generation"**, 1985.
- Pinheiro & Trinkenreich, 1980 : PINHEIRO, Solange F. e TRINKENREICH, Jorge **"Expansão a Longo Prazo do Sistema Elétrico Usando Programação Linear"**, relatório interno da divisão de Planejamento da Geração, Eletrobras, 1980.
- Psarras *et alli*, 1990 : PSARRAS, J., CAPROS, P. e SAMOUILIDIS, J.-E., **"Multiobjective Programming"**, capítulo 4 da edição especial de "Long-Term Strategies for Mitigating Global Warming", Energy, Pergamon Press, vol.15, nº7/8, p.586-605, 1990.
- Ramanathan & Ganesh, 1995 : RAMANATHAN, R. e GANESH, L. S., **"A Multiobjective Evaluation of Energy Alternatives for Water Pumping in Urban Households"**, Energy Sources, Taylor & Francis, vol.17, nº2, p.223-239, 1995.
- Romeno & Rehman, 1989 : ROMENO, Carlos e REHMAN, Tahir, **"Multi-Criteria Analysis for Agricultural Decisions"**, Elsevier, p.260, 1989.
- Shin & Ravidran, 1991 : SHIN, Wan S. e RAVINDRAN, A., **"Interactive Multiple Objective Optimization : survey 1 - continuous case"**, Computers Operations Resources, Pergamon Press, vol.18, nº1, p.97-114, 1991.
- Steuer, 1977 : STEUER, Ralph E., **"An Interactive Multiple Objective Linear Programming Procedure"**, TIMS Studies in the Management Sciences, vol.6, p.225-239, 1977.

- Steuer, 1986 : STEUER, Ralph E., **"Multiple Criteria Optimization : theory, computation and application"**, John Wiley & Sons Inc., 1ª edição, p.548, 1986.
- SUN, 1989 : Sun Microsystems Inc., **"SUN™ Pascal User Guide"**, 1989.
- Teghem & Kunsch, 1986 : TEGHEM Jr., J. e KUNSCH, P. L., **"Interactive Methods for Multi-Objective Integer Linear Programming"**, Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, Springer Verlag, vol.273, pp 75-87, 1986.
- Thomas & Yates, 1989 : THOMAS, Rebecca e YATES, Jean, **"UNIX Total"**, McGraw-Hill, p.744, 1989.
- Tzeng *et alli*, 1994 : TZENG, Gwo H., SHIAU, Tzay A., TENG, Junn Y., **"Multiobjective Decision-Making Approach to Energy Supply Mix Decisions in Taiwan"**, Energy Sources, Taylor & Francis, vol.16, nº3, p.301-316, 1994.
- Walter, 1994 : WALTE, Arnaldo C. da S., **"Viabilidade e Perspectivas da Cogeração e da Geração Termoeletrica Junto ao Setor Sucro-Alcooleiro"**, Tese de Doutorado defendida na área de Planejamento de Sistema Energético da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP, p.259, 1994.
- Zadeh, 1963 : ZADEH, L. A., **"Optimality and Non-scalar-valued performance criteria"**, IEEE Transaction on Automatic Control, nº8, p.59-60, 1963.
- Zeleny, 1974 : ZELENY, M - **"Linear Multiobjective Programming"**, Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, Springer Verlag, vol.95, 1974.
- Zionts & Wallenius, 1976 : ZIONTS, S. e WALLENIOUS, J. **"An Interactive Programming for Solving the Multiple Criteria Problem"** Management Science, vol.22, nº6, p.652-663, 1976.
- Zionts & Wallenius, 1983 : ZIONTS, S. e WALLENIOUS, J. **"An Interactive Multiple Objective Linear Programming Method for a Class of Underlying Nonlinear Functions"**, Management Science, vol.29, nº5, p.519-529, 1983.
- Zylberstajn & Bernini, 1993 : ZYLBERSTAJN, David e BERNINI, Eduardo José, **"Avaliação Energética e as Externalidade"**, Revista Brasileira de Energia, vol.3, nº1, 1993.