

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL**

**“OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO PARA A
OPERAÇÃO DE SISTEMAS URBANOS DE
ABASTECIMENTO DE ÁGUA”**

Alberto Luiz Francato

**UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE**

Campinas
Fevereiro / 2002

**UNICAMP
BIBLIOTECA**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL**

**“OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO PARA A
OPERAÇÃO DE SISTEMAS URBANOS DE
ABASTECIMENTO DE ÁGUA”**

Doutorando: MSc. Alberto Luiz Francato

Orientador: Prof. Dr. Paulo Sérgio Franco Barbosa

Tese de Doutorado apresentada à
Faculdade de Engenharia Civil da
UNICAMP, como parte dos requisitos
para a obtenção do título de Doutor
em Engenharia Civil, Área de
Concentração Recursos Hídricos

Atesto que esta é a versão definitiva
da dissertação/tese.

22,05,02

Prof. Dr.

Matrícula:

Pl. JMB

069922

Campinas
Fevereiro / 2002

UNIDADE Be
 Nº CHAMADA T/UNICAMP
F844G
 V _____ EX _____
 TOMBO BC/ 49961
 PROC 16-83710 0
 C _____ DX _____
 PREÇO R\$ 11,00
 DATA _____
 Nº CPD _____

CM00170450-6

BIB ID 247017

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

F844o

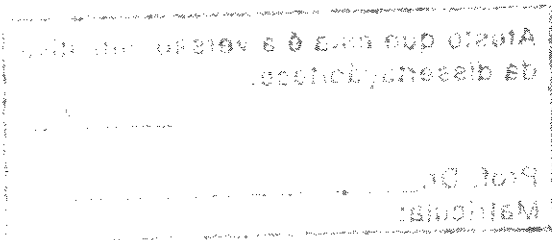
Francato, Alberto Luiz

Otimização multiobjetivo para a operação de sistemas urbanos de abastecimento de água. / Aberto Luiz Francato. -- Campinas, SP: [s.n.], 2002.

Orientador: Paulo Sérgio Franco Barbosa.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil.

1. Recursos hídricos - Desenvolvimento. 2. Otimização matemática. 3. Programação linear. 4. Abastecimento de água. 5. Engenharia hidráulica. I. Barbosa, Paulo Sérgio Franco. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil. III. Título.



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL**

**“OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO PARA A OPERAÇÃO DE
SISTEMAS URBANOS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA”**

Doutorando: MSc. Alberto Luiz Francato

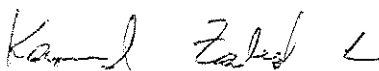
Tese de Doutorado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:



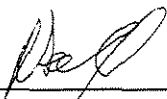
Prof. Dr. Paulo Sérgio Franco Barbosa
Presidente e Orientador
FEC - UNICAMP



Prof. Dr. Oscar de Moraes Cordeiro Netto
FT - UnB



Prof. Dr. Kamel Zahed Filho
EP - USP



Prof. Dr. Renato Soliani
FEC - UNICAMP



Prof. Dr. José Geraldo Pena de Andrade
FEC - UNICAMP

Campinas, 25 de fevereiro de 2002

1941680

*A Heloísa,
pelo amor, companheirismo e incentivo.*

AGRADECIMENTOS

Gostaria de externar os meus mais sinceros agradecimentos às seguintes pessoas:

Ao Prof. Dr. Paulo Sérgio Franco Barbosa, orientador deste trabalho, pela paciência, dedicação, incentivo, por muitas idéias e por ter dado total apoio ao desenvolvimento deste projeto.

Ao Prof. Dr. Renato Soliani pelo acompanhamento, incentivo e amizade na realização do trabalho.

Ao Prof. Dr. Kamel Zahed Filho pela colaboração desde o exame de qualificação e principalmente com a disponibilidade de dados físicos reais para o estudo de caso do trabalho.

A todos os demais professores, colegas pós-graduandos e funcionários da FEC – UNICAMP pelo carinho e amizade neste tempo de convívio.

À minha noiva Heloísa pelo amor, companheirismo, paciência e incentivo, desde o nascimento deste trabalho.

Aos meus pais João e Maria Tereza, meu irmão Álvaro, pelo incentivo e compreensão.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo apoio financeiro, sob a forma de Bolsa de Doutorado.

FRANCATO, A.L. Otimização Multiobjetivo para a Operação de Sistemas Urbanos de Abastecimento de Água. Tese (Doutorado). Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, 182p. Campinas. Fevereiro 2002.

RESUMO

A operação adequada dos sistemas urbanos de abastecimento de água está diretamente relacionada à qualidade da oferta do produto água à população. A otimização desses sistemas surge como alternativa para buscar soluções eficientes e também eficazes e garantindo assim a gestão dos sistemas. Na literatura relacionada ao assunto, verifica-se o desenvolvimento de muitos trabalhos com a aplicação e o desenvolvimento de rotinas computacionais de otimização específicas para redes hidráulicas. Contudo, observam-se dificuldades nas ações dos decisores dos sistemas, pois, na realidade, existem objetivos operacionais conflitantes e que merecem atenção. Diante desse quadro, desenvolveu-se uma metodologia para aplicação de otimização multiobjetivo ao problema da operação de redes hidráulicas. A metodologia utiliza o software de programação linear GAMS/CONOPT com recursos iterativos e a abordagem multiobjetivo do problema se faz com a aplicação do Método dos Pesos. O estudo de caso é feito sobre o setor alça leste do sistema adutor metropolitano da grande São Paulo. Como resultados, apresentam-se curvas de soluções não-dominadas para as funções objetivo aplicadas aos sistemas de abastecimento em estudo.

Palavras-chave: Redes Hidráulicas, Otimização Multiobjetivo, Programação Linear, Recursos Hídricos, Abastecimento de Água.

ABSTRACT

The proper operation of the urban water supply systems has a direct impact on the water to be provided to the quality consumers. The optimization of these systems appears as an alternative to search efficient and also efficient solutions, thus guaranteeing the management of the systems. Many research works have been reported in the literature describing applications and specific computational routines for optimization of hydraulics networks. However, some difficulties for taking decisions have also been reported since there are conflicting objectives in the real word context, which deserve proper attention. A multiobjective approach for operation planning of hydraulic networks is developed considering that context. The methodology uses the software of linear programming GAMS/CONOPT with iterative procedures. The multiobjective formulation of the problem uses the Weighting Method. The case study is made on the East sector of the metropolitan system of the great São Paulo. The results present solutions as the typical non-dominated curves.

Key-Words: Hydraulics Networks, Multiobjective Optimization, Linear Programming, Water Resources, Water Supply.

SUMÁRIO

Resumo.....	vii
Abstract.....	viii
Lista de Figuras.....	xiii
Lista de Tabelas.....	xvi
Lista de Variáveis.....	xviii
Lista de Siglas.....	xxiii
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 DIFICULDADES NA GESTÃO DE SISTEMAS DE URBANOS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA NO BRASIL.....	5
2.1 Introdução.....	5
2.2 Conhecimento do sistema.....	7
2.3 Problemas na estrutura organizacional das empresas.....	8
2.4 Gestão de pessoas na era da informação.....	12
2.5 A administração dos serviços nas empresas de abastecimento.....	12
2.6 Alguns progressos no cenário nacional.....	14
2.7 Conclusão.....	15
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
3.1 O Uso da Análise de Sistemas na Engenharia de Recursos Hídricos.....	16
3.2 A Modelagem da Operação de Sistemas de Abastecimento de Água.....	20
3.3 Classificação dos Modelos Matemáticos para Análise de Sistemas de Recursos Hídricos.....	24
3.4 Técnicas de Pesquisa Operacional.....	25
3.4.1 Simulação de Sistemas.....	25

3.4.2	Otimização de Sistemas.....	27
3.5	A Otimização Multiobjetivo.....	31
3.5.1	Otimização Multiobjetivo da Operação de Sistemas de Recursos Hídricos.....	35
3.6	Classificação das Técnicas Multiobjetivo.....	37
3.6.1	Técnicas para Geração de Soluções Não-Dominadas	37
3.6.2	Técnicas com Articulação Prévia de Preferências.....	38
3.6.3	Técnicas com Articulação Progressiva de Preferências	40
3.7	Apresentação do Método dos Pesos.....	41
3.7.1	Exemplo de Aplicação do Método dos Pesos.....	42
3.7.2	Interpretação Geométrica do Método dos Pesos.....	44
3.8	Métodos para Projeto e Operação de Redes Hidráulicas	45
3.8.1	Método de Hardy-Cross.....	46
3.8.2	Método de Newton Raphson.....	46
3.8.3	Método da Teoria Linear.....	47
4.	ESTUDO e Modelagem dos Principais Acessórios das Redes Hidráulicas.....	50
4.1	Descrição dos Sistemas de Abastecimento de Água e seus Componentes.....	50
4.1.1	Redes Hidráulicas.....	50
4.1.2	Reservatórios.....	51
4.1.3	Estações de Bombeamento (“Boosters”).....	52
4.1.4	Válvulas.....	52
4.2	Modelagem Matemática dos Componentes dos Sistemas de Abastecimento de Água.....	53
4.2.1	Tubulações.....	53
4.2.2	Modelagem de “Boosters”.....	55
4.2.3	Modelagem de Válvulas.....	61
4.2.3.1	Modelagem da válvula pelo ábaco de LEVIN.....	62
4.2.3.2	Modelagem da válvula por uma curva genérica.....	64
4.2.4	Modelagem de Reservatórios.....	66

5.	DESENVOLVIMENTO DO MODELO COMPUTACIONAL.....	67
5.1	Equacionamento do modelo matemático.....	68
5.2	Estudo das Funções Objetivo.....	68
5.2.1	Minimização da flutuação na vazão da ETA.....	69
5.2.2	Minimização dos custos com energia elétrica.....	70
5.2.3	Maximização dos níveis dos reservatórios.....	70
5.2.4	Minimização da Pressão Média nos Nós.....	71
5.2.5	Minimização da Perda de Carga nas Válvulas.....	71
5.3	Função Objetivo.....	72
5.4	Restrições e equações auxiliares.....	73
5.4.1	Balanço de massa nos nós.....	73
5.4.2	Balanço de energia nos trechos da rede.....	74
5.4.3	Regime de operação dos reservatórios.....	74
5.4.4	Manutenção dos níveis máximos e mínimos nos reservatórios.....	75
5.4.5	Regime de operação do "booster".....	75
5.4.6	Limitação das rotações máximas e mínimas da bomba do "booster".....	76
5.4.7	Limitação das alturas manométricas máximas e mínimas do "booster".....	76
5.4.8	Limitação das pressões máximas e mínimas nos nós da rede.....	77
5.4.9	Limitação de velocidades máximas (em módulo) nos tubos da rede.....	77
5.4.10	Cálculo da perda de carga em cada trecho da rede.....	78
5.4.11	Cálculo da abertura das válvulas de controle.....	79
5.5	Descrição do Modelo Computacional.....	80
5.5.1	Alguns detalhes da modelagem de otimização.....	82
6.	ESTUDO DE CASO.....	87
6.1	Visitas às empresas de abastecimento de água.....	87
6.2	Seleção de uma rede hidráulica para estudo de caso.....	89
6.3	Dados referentes ao Subsistema Adutor – Alça Leste.....	89
6.4	Apresentação de resultados.....	95

6.4.1	Análise multiobjetivo para as funções Z_1 e Z_2	96
6.4.2	Análise multiobjetivo para as funções Z_1 e Z_3	98
6.4.3	Análise multiobjetivo para as funções Z_1 e Z_4	100
6.4.4	Análise multiobjetivo para as funções Z_1 e Z_5	102
6.4.5	Análise multiobjetivo para as funções Z_2 e Z_3	104
6.4.6	Análise multiobjetivo para as funções Z_2 e Z_4	106
6.4.7	Análise multiobjetivo para as funções Z_2 e Z_5	108
6.4.8	Análise multiobjetivo para as funções Z_3 e Z_4	110
6.4.9	Análise multiobjetivo para as funções Z_3 e Z_5	112
6.4.10	Análise multiobjetivo para as funções Z_4 e Z_5	114
6.5	Síntese dos Resultados.....	115
7.	CONCLUSÕES.....	119
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	125
	Apêndice – A.....	134
	Apêndice – B.....	142
	Apêndice – C.....	161
	Apêndice – D.....	180

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Esquema organizacional simplificado das empresas.....	10
Figura 2.2	Esquema organizacional simplificado das empresas com interação nas decisões entre departamentos.....	11
Figura 3.1	Superfície de soluções não-dominadas.....	34
Figura 3.2	Estrutura em dois níveis.....	35
Figura 3.3	Plotagem das funções objetivo.....	44
Figura 3.4	Interpretação geométrica do método dos pesos.....	45
Figura 4.1	Esquema de um trecho com uma bomba.....	55
Figura 4.2	Ponto de funcionamento de uma bomba.....	56
Figura 4.3	Ajuste de altura manométrica por meio de válvula.....	57
Figura 4.4	Curvas manométricas de bombas para diferentes velocidades de rotação.....	58
Figura 4.5	Pontos característicos para equacionamento da curva da bomba.....	58
Figura 4.6	Relação entre porcentagem de abertura da válvula e o coef. K_L	63
Figura 4.7	Curva genérica de válvula.....	65
Figura 5.1	Fluxograma do modelo desenvolvido.....	84
Figura 6.1	Topologia do Subsistema Adutor Metropolitano (São Paulo) – Alça Leste.....	90
Figura 6.2	Curva de soluções não-dominadas entre as funções objetivo Z_1 e Z_2 (Valores Médios).....	97
Figura 6.3	Curva de soluções não-dominadas entre as funções objetivo Z_1 e Z_2 (Valores Máximos).....	98
Figura 6.4	Curvas integradas de soluções das funções objetivo Z_1 e Z_2	98
Figura 6.5	Curva de soluções não-dominadas entre as funções objetivo Z_1 e Z_3 (Valores Médios).....	99

Figura 6.6	Curvas integradas de soluções das funções objetivo Z_1 e Z_3	100
Figura 6.7	Curva de soluções não-dominadas entre as funções objetivo Z_1 e Z_4 (Valores Médios).....	101
Figura 6.8	Curva de soluções não-dominadas entre as funções objetivo Z_1 e Z_4 (Valores Máximos).....	101
Figura 6.9	Curvas integradas de soluções das funções objetivo Z_1 e Z_4	102
Figura 6.10	Curva de soluções não-dominadas entre as funções objetivo Z_1 e Z_5 (Valores Médios).....	103
Figura 6.11	Curva de soluções não-dominadas entre as funções objetivo Z_1 e Z_5 (Valores Médios - Válvula 5).....	103
Figura 6.12	Curva de soluções não-dominadas entre as funções objetivo Z_1 e Z_5 (Valores Máximos).....	104
Figura 6.13	Curvas integradas de soluções das funções objetivo Z_1 e Z_5	104
Figura 6.14	Curva de soluções não-dominadas entre as funções objetivo Z_2 e Z_3 (Valores Médios).....	105
Figura 6.15	Curva de soluções não-dominadas entre as funções objetivo Z_2 e Z_3 (Valores Máximos).....	106
Figura 6.16	Curvas integradas de soluções das funções objetivo Z_2 e Z_3	106
Figura 6.17	Curva de soluções não-dominadas entre as funções objetivo Z_2 e Z_4 (Valores Médios).....	107
Figura 6.18	Curva de soluções não-dominadas entre as funções objetivo Z_2 e Z_4 (Valores Máximos).....	108
Figura 6.19	Curvas integradas de soluções das funções objetivo Z_2 e Z_4	108
Figura 6.20	Curva de soluções não-dominadas entre as funções objetivo Z_2 e Z_5 (Valores Médios).....	109
Figura 6.21	Curva de soluções não-dominadas entre as funções objetivo Z_2 e Z_5 (Valores Máximos).....	110
Figura 6.22	Curvas integradas de soluções das funções objetivo Z_2 e Z_5	110
Figura 6.23	Curva de soluções não-dominadas entre as funções objetivo Z_3 e Z_4 (Valores Médios).....	111
Figura 6.24	Curva de soluções não-dominadas entre as funções objetivo Z_3 e Z_4	

	(Valores Máximos).....	112
Figura 6.25	Curvas integradas de soluções das funções objetivo Z_3 e Z_4	112
Figura 6.26	Curva de soluções não-dominadas entre as funções objetivo Z_3 e Z_5 (Valores Médios).....	113
Figura 6.27	Curvas integradas de soluções das funções objetivo Z_3 e Z_5	114
Figura 6.28	Curvas integradas de soluções das funções objetivo Z_4 e Z_5	115
Figura 6.29	Estudo de grau de compromisso entre funções objetivo.....	117
Figura 1.A4	Curva manométrica do “booster” Cangaíba.....	181

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	Variação nos pesos W_i	43
Tabela 4.1	Coeficientes para cálculo da abertura da válvula.....	64
Tabela 5.1	Descrição dos arquivos do modelo.....	85
Tabela 6.1	Resumo das visitas realizadas a empresas de saneamento.....	88
Tabela 6.2	Demanda média associada a cada reservatório.....	92
Tabela 6.3	Demanda média associada a outras alças.....	93
Tabela 6.4	Estatística da demanda a cada reservatório.....	93
Tabela 6.5	Combinações de Pesos – Funções Z_1 e Z_2	96
Tabela 6.6	Combinações de Pesos – Funções Z_1 e Z_3	99
Tabela 6.7	Combinações de Pesos – Funções Z_1 e Z_4	100
Tabela 6.8	Combinações de Pesos – Funções Z_1 e Z_5	102
Tabela 6.9	Combinações de Pesos – Funções Z_2 e Z_3	105
Tabela 6.10	Combinações de Pesos – Funções Z_2 e Z_4	107
Tabela 6.11	Combinações de Pesos – Funções Z_2 e Z_5	109
Tabela 6.12	Combinações de Pesos – Funções Z_3 e Z_4	111
Tabela 6.13	Combinações de Pesos – Funções Z_3 e Z_5	113
Tabela 6.14	Combinações de Pesos – Funções Z_4 e Z_5	114
Tabela 6.15	Classificação de compromissos.....	116
Tabela 6.16	Classificação Quanto aos compromissos das soluções.....	117
Tabela 6.17	Possíveis combinações de pesos.....	118
Tabela 1.A1	Dados referentes à combinação de pesos C12 – 11.....	135
Tabela 2.A1	Dados referentes à combinação de pesos C12 – 11.....	136
Tabela 3.A1	Dados referentes à combinação de pesos C12 – 11.....	137
Tabela 4.A1	Dados referentes à combinação de pesos C12 – 11.....	138

Tabela 5.A1	Dados referentes à combinação de pesos C12 – 11.....	139
Tabela 6.A1	Dados referentes à combinação de pesos C12 – 11.....	140
Tabela 7.A1	Dados referentes à combinação de pesos C12 – 11.....	141
Tabela 1.A4	Pontos da curva manométrica do “booster” Cangaíba.....	181
Tabela 2.A4	Valores operacionais de rotação do “booster”.....	182

LISTA DE VARIÁVEIS

B	: Índice referente ao “booster”.
$(C_{a,b})_i$	: Combinação de pesos i entre as funções a e b ;
$C_{0,b}$	: Coeficiente 0 da curva manométrica do “booster” b ;
$C_{1,b}$	: Coeficiente 1 da curva manométrica do “booster” b ;
$C_{2,b}$	: Coeficiente 2 da curva manométrica do “booster” b ;
CD_t	: Coeficiente de demanda (curva neutra) no tempo t ;
CG_n	: Cota geométrica do nó n (m);
C_l	: Coeficiente C de Hazen-Williams para o trecho l ;
$C_{pjus_{l,t}}$	: Cota piezométrica de jusante do trecho l no tempo t (mca);
$C_{pmont_{l,t}}$	: Cota piezométrica de montante do trecho l no tempo t (mca);
$CP_{n,t}$	: Cota piezométrica do nó n no tempo t (mca);
D_l	: Diâmetro do trecho l (m);
e	: Rugosidade da parede da tubulação (m);
E_1	: Primeira variável auxiliar para o equacionamento da curva de LEVIN;
E_2	: Segunda variável auxiliar para o equacionamento da curva de LEVIN;
$f(x)$	: Função multiobjetivo escalar;
$f_{l,t}$	: Fator de atrito para o trecho l no tempo t ;
FMO	: Função multiobjetivo;
$FPC_{l,t}$	: Coeficiente de cálculo da perda de carga no trecho l no tempo t (s/m ²);
g	: Aceleração da gravidade (m/s ²).
$g_i(x)$	: Função objetivo i ;
H_1	: Altura piezométrica no nó 1 (mca);
H_2	: Altura piezométrica no nó 2 (mca);
H_M	: Altura manométrica do ponto de trabalho da Bomba (mca);

$HMB_{b,t}$	: Altura manométrica fornecida pelo “booster” b no tempo t (mca);
$HMB_{b,t}$	: Altura manométrica no “booster” b no tempo t (mca);
$HMB_{máx,b}$	: Altura manométrica máxima operacional para o “booster” b (mca);
$HMB_{mín,b}$	: Altura manométrica mínima operacional para o “booster” b (mca);
H_R	: Altura manométrica quando o rendimento for máximo (mca);
HR_F	: Cota final do nível d’água no reservatório (m);
HR_I	: Cota inicial do nível d’água no reservatório (m);
$HR_{máx,r}$	: Nível d’água máximo de armazenamento no reservatório r (m);
$HR_{mín,r}$	: Nível d’água mínimo de armazenamento no reservatório r (m);
$HR_{r,t}$	: Nível d’água no reservatório r no tempo t (m);
$HR_{r,t+1}$	: Nível d’água no reservatório r no tempo $t+1$ (m);
H_S	: Altura manométrica quando a vazão for zero (shut off) (mca);
H_T	: Altura manométrica num ponto qualquer (mca);
H_X	: Altura manométrica no ponto de funcionamento para a rotação n (m);
K	: Coeficiente para cálculo da perda de carga referente a iteração i ;
K^*	: Coeficiente para cálculo da perda de carga referente à iteração i , com o valor da vazão da iteração $(i-1)$;
$K_{MÁX}$	: Valor do coeficiente de perda de carga máximo operacional.
$K_{v,máx}$	: Coeficiente de perda de carga localizada máxima para a válvula v no tempo t ;
$K_{v,t}$	: Coeficiente de perda de carga localizada para a válvula v no tempo t ;
L	: Comprimento do trecho (m);
l	: Índice referente ao trecho;
$L1$	: Parte do comprimento do trecho a montante do “booster” (m);
$L2$	: Parte do comprimento do trecho a jusante do “booster” (m);
L_l	: Comprimento do trecho l (m);
N	: Índice referente ao nó;
n	: Expoente da Vazão na expressão para cálculo da perda de carga.
$n_{b,t}$	: Rotação do “booster” b no tempo t (rpm);
$n_{máx,b}$	: Rotação máxima operacional para o “booster” b no tempo t (rpm);
$n_{mín,b}$	: Rotação mínima operacional para o “booster” b no tempo t (rpm);

n_n	: Rotação normal de funcionamento do “booster” (rpm);
NN	: Número de nós do sistema;
$n_{n,b}$	: Rotação nominal do “booster” b (rpm);
NR	: Número de reservatórios no sistema;
$NRF_{b,r}$	: Nível do reservatório r no tempo t (m);
NV	: Número de válvulas no sistema;
$PC_{l,t}$	: Perda de carga no trecho l no tempo t (mca);
$PCV_{t,v}$	: Perda de carga na válvula v no tempo t (mca);
$PCV_{v,t}$	: Perda de carga na válvula v no tempo t (mca);
$P_{máx}$	: Pressão máxima (mca);
$P_{mín}$	: Pressão mínima (mca);
$P_{t,n}$	: Pressão disponível no nó n na hora t (mca);
Q	: Vazão no trecho (m^3/s);
Q_i	: Vazão no trecho para a iteração i (m^3/s);
Q_A	: Vazão aduzida ao reservatório (m^3/s);
$Q_{BOOSTERt}$	: Vazão no trecho onde o “booster” está instalado no tempo t (m^3/s);
$\widehat{QD}_n$	: Demanda média no nó n (m^3/s);
$QD_{r,t}$	: Demanda associada ao reservatório r no tempo t (m^3/s);
$QETA_t$	: Vazão aduzida na ETA no tempo t (m^3/s);
QM	: Vazão média de aduzida na ETA (m^3/s);
Q_R	: Vazão correspondente ao ponto de rendimento máximo (m^3/s);
Q_T	: Vazão correspondente a um ponto qualquer (m^3/s).
$QT_{n,t}$	: Vazão que chega ao nó n no tempo t (m^3/s);
$QT_{n,t}^-$	: Vazão que sai do nó n no tempo t (m^3/s);
$QT_{b,t}$	: Vazão no “booster” b no tempo t (m^3/s);
$QT_{b,t}^{ant}$	: Vazão no “booster” b no tempo t na iteração anterior (m^3/s);
$QT_{l,t}$	: Vazão do trecho l no tempo t (m^3/s);
$QT_{l,t}^{ant}$	: Vazão no trecho l no tempo t na iteração anterior (m^3/s);
$QT_{r,t}$	: Vazão afluyente ao reservatório r no tempo t (m^3/s);
$QT_{v,t}$	: Vazão na válvula v no tempo t (m^3/s).

Q_x	: Vazão no ponto de funcionamento para a rotação n (m^3/s);
R	: Índice referente ao reservatório.
Re_y	: Número de Reynolds;
SB	: Área da seção transversal da base do reservatório cilíndrico (m^2);
SB_r	: Área da seção da base do reservatório cilíndrico r (m^2);
T	: Índice referente ao tempo.
t	: Índice referente ao tempo;
V	: Índice referente à válvula;
$V_{máx}$	: Velocidade máxima permissível no trecho (m/s);
$V_{mín}$	: Velocidade mínima permissível no trecho (m/s);
w_i	: Coeficiente de peso i associado a função objetivo i ;
w_1	: Coeficiente de peso associado a função objetivo 1;
w_2	: Coeficiente de peso associado a função objetivo 2;
w_3	: Coeficiente de peso associado a função objetivo 3;
w_4	: Coeficiente de peso associado a função objetivo 4;
w_5	: Coeficiente de peso associado a função objetivo 5;
X	: Porcentagem de abertura da válvula (%);
X_C	: Coordenada X do centro da circunferência;
X_o	: Coordenada X da circunferência;
$X_{v,t}$	: Abertura da válvula v no tempo t (%);
Y_C	: Coordenada Y do centro da circunferência.
Y_o	: Coordenada Y da circunferência;
Z_1	: Função Objetivo 1.
Z_2	: Função Objetivo 2.
Z_3	: Função Objetivo 3;
Z_4	: Função Objetivo 4.
Z_5	: Função Objetivo 5.
Δh_i	: Perda de carga na iteração i de um dado trecho da malha (mca);
Δh_1	: Perda de carga do nó 1 até a bomba (mca);
Δh_2	: Perda de carga da bomba até o nó 2 (mca);

Δh_v	: Perda de carga localizada na válvula (mca);
ΔQ	: Diferença na vazão entre uma iteração i e a iteração (i-1) (m ³ /s);
ΔQ_t	: Variação da vazão da ETA no tempo t (m ³ /s);
Δt	: Intervalo de tempo (h);
π	: Constante matemática;
ϑ	: Viscosidade cinemática do água (m ² /s).

LISTA DE SIGLAS

	:
ABES	: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária;
ABRH	: Associação Brasileira de Recursos Hídricos;
ASSEMAE	: Associação Nacional dos Serviços Municipais de Saneamento;
CAERD	: Companhia de Águas e Esgotos de Rondônia;
CAESA	: Companhia de Água e Esgoto do Amapá;
CAESB	: Companhia de Água e Esgoto de Brasília;
CASAN	: Companhia Catarinense de Águas e Saneamento;
CEDAE	: Companhia Estadual de Águas e Esgoto;
COMPESA	: Companhia Pernambucana de Saneamento;
COPASA	: Companhia de Saneamento de Minas Gerais;
CORSAN	: Companhia Riograndense de Saneamento;
EMBASA	: Empresa Baiana de Águas e Saneamento;
ETA	: Estação de Tratamento de Água;
SABESP	: Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo;
SANEAGO	: Saneamento de Goiás;
SANEPAR	: Companhia de Saneamento do Paraná
SANESUL	: Companhia de Saneamento do Mato Grosso do Sul;
SIG	: Sistema de Informações Georeferenciadas;
SNIS	: Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento;

1. INTRODUÇÃO

Foi estudada neste trabalho uma formulação multiobjetivo para o problema da operação de um sistema macroadutor de abastecimento urbano de água. O sistema escolhido, para estudo de caso, foi a alça leste do sistema adutor metropolitano da Grande São Paulo, o qual representa um sistema de porte expressivo e com flexibilidade operacional suficiente para a aplicação de uma modelagem matemática de otimização.

O problema da operação dos sistemas urbanos de abastecimento de água ocorre em muitas cidades do estado de São Paulo e do Brasil. Durante o desenvolvimento deste trabalho de pesquisa realizaram-se visitas técnicas a várias empresas responsáveis pelo abastecimento de água em cidades de pequeno, médio e grande porte. Nessas visitas, procurou-se entrevistar os gestores responsáveis pela operação dos sistemas e assim identificar potenciais problemas que desafiam a operação dos mesmos. Dentre os problemas mais comuns, destacam-se: o elevado índice de perdas físicas de água, volumes inadequados dos reservatórios que dificultam a manutenção de uma adução constante na ETA, gastos elevados com energia elétrica, constantes necessidades de manobras emergenciais, cadastros técnicos desatualizados, etc. Os problemas citados, de um modo geral, podem-se enquadrar em algumas categorias como:

- problemas de gestão administrativa das empresas em que se inclui a baixa qualificação profissional dos funcionários, a falta de responsabilidade dos serviços executados;

- problemas político-institucionais resultantes da falta de continuidade das ações de uma administração pública para outra e da falta de competição entre empresas;
- problemas técnicos e operacionais que resultam numa operação inadequada do sistema.

Com o envelhecimento das redes hidráulicas é praticamente certo o surgimento de problemas operacionais. LUVIZOTTO JUNIOR (1995) lembra que muitos sistemas de abastecimento que apresentam desempenho satisfatório, ao longo dos anos, passam a enfrentar problemas, tais como: incrementos nas vazões aduzidas, perdas por vazamentos, cavitação em válvulas e bombas, falhas em alguns mecanismos de controle e até rompimento de tubulações. VENTURINI (1997a) ressalta que, devido ao intenso crescimento populacional ocorrido no Brasil, principalmente até a década de oitenta, são necessários grandes esforços no âmbito técnico, organizacional e financeiro, por parte dos sistemas de abastecimento de água na tentativa de atender à demanda.

O problema da operação de redes hidráulicas para abastecimento urbano de água também é sentido em outros países, pois tal problema é agravado com a escassez de recursos hídricos. As técnicas de planejamento e operação de sistemas de abastecimento de água já vêm sendo utilizadas há algum tempo em muitos países, como é o caso da França, Alemanha, etc. Esses países, além de necessitarem de técnicas de abastecimento da água eficientes, também necessitam de políticas de controle e adequação da oferta ao consumo. Na tentativa de redução de custos operacionais em um sistema de abastecimento de água para Austin, Texas-EUA, BRION e MAYS (1991) testaram um modelo de otimização e simulação conseguindo, com uma política otimizada de bombeamento, uma redução de 17,3% no custo operacional que vinha sendo realizado até então (modelo PMPOPR - Pump Operation). ORMSBEE e REDDY (1995) aplicaram um algoritmo de otimização em Washington-DC e obtiveram resultados significativos com a política fornecida pelo modelo, observando uma redução de 6,9% nos custos com energia elétrica. Para TARQUIN e DOWDY

(1989), há duas razões que evidenciam que é possível uma redução nos custos operacionais em sistema de abastecimento de água. Em primeiro lugar, os projetos das redes de abastecimento são elaborados pensando no projeto ótimo atual, sem pensar na expansão do mesmo e numa eventual otimização do projeto como um todo; em segundo lugar, observam-se, geralmente, deficiências na manutenção dos acessórios do sistema.

Apesar de muitas técnicas de otimização já estarem disponíveis no Brasil e em outros países, o problema carece de uma abordagem multiobjetivo. O grau de compromisso entre as soluções na operação merece ser avaliado para que seja possível tomar decisões sobre o problema da operação não apenas com base em um único objetivo. Vários trabalhos têm sido realizados para diminuir os índices de perdas nas redes, minimizar os custos nos sistemas e desenvolver medidas operativas ótimas para equalizar as pressões na distribuição. No panorama atual da gestão dos sistemas urbanos de abastecimento de água, verificou-se carência no desenvolvimento de análises multiobjetivo da operação dos mesmos, podendo assim contemplar vários critérios. Verificam-se dificuldades no dia-a-dia da operação de sistemas de abastecimento de água para os operadores manipularem múltiplos objetivos de maneira não estruturada, evidenciando, assim, a necessidade do desenvolvimento de ferramentas de auxílio à tomada de decisão.

Para que se possa aplicar essa abordagem multiobjetivo, é necessário o conhecimento dos objetivos que permeiam a operação de um sistema de abastecimento de água. Assim, é imprescindível o contato constante com os profissionais envolvidos com o dia-a-dia da empresa.

A minimização dos custos diretos, como por exemplo: custo relativo à energia elétrica, deve ser o principal objetivo operacional de um sistema? Qual o acréscimo, no custo com energia elétrica, caso seja considerado também como objetivo a minimização da pressão nos nós da rede? Ou quanto influencia a oscilação de vazão na ETA? Essas questões não têm respostas imediatas e somente uma modelagem pode fornecer as

relações de compromissos entre as soluções. Tais questões foram objeto de investigação nessa tese. É importante destacar que, embora cada um dos objetivos já tenham sido tratados individualmente em muitos trabalhos citados na literatura, o tratamento multiobjetivo que se propõe e o nível de representação dos componentes dos sistemas como aqui estudado são contribuições originais deste trabalho.

O texto está organizado em capítulos, sendo a descrição dos mesmos a seguinte: neste primeiro capítulo, fez-se a introdução ao assunto da tese; no capítulo dois, apresenta-se um breve estudo sobre gestão de sistemas urbanos de abastecimento de água; no capítulo três, desenvolveu-se uma revisão bibliográfica sobre o tema da tese, passando pela importância do tema e chegando às técnicas específicas de pesquisa operacional (programação multiobjetivo); no capítulo quatro, apresenta-se uma descrição dos componentes das redes hidráulicas, bem como suas respectivas modelagens matemáticas; no capítulo cinco, apresenta-se a metodologia desenvolvida, mostrando as características da modelagem matemática; no capítulo seis, é apresentada a rede utilizada para estudo de caso e, em seguida, apresentam-se os resultados obtidos com a aplicação do modelo; no capítulo sete, conclui-se o trabalho e recomendam-se extensões da pesquisa.

2. DIFICULDADES NA GESTÃO DE SISTEMAS URBANOS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA NO BRASIL

2.1. Introdução

Nos últimos anos, a administração de serviços públicos ou privados vem sendo impulsionada pela globalização, evidenciando a necessidade de mudanças nos meios de produção e comercialização. Os padrões atuais dos serviços já não são suficientes e, com a tendência de quebra de monopólios, a competição por uma fatia do mercado é cada vez mais acirrada. Podemos ver exemplos de setores que já se transformaram ou vêm-se organizando como: telecomunicações, energia, transportes, mineração, etc.

Os setores responsáveis pelo abastecimento urbano de água não são diferentes. A tendência de concessões privadas em serviços de água e esgoto apresenta atrativos importantes que qualificam como novo fator de retomada de crescimento do setor no Brasil, interrompido devido à atrofia dos mecanismos de financiamento que o sustentaram nas décadas passadas. PARLATORE (2000) ressalta que apesar do grande esforço do poder público para melhorar o atendimento às necessidades de saneamento nos últimos 30 anos, acumulou-se uma longa lista de problemas, que podem ser assim caracterizados: prioridade na produção de água em detrimento da otimização dos sistemas, atuação deficiente na área comercial, atendimento deficiente aos usuários, aumento excessivo do quadro de pessoal, atraso tecnológico e gerencial, descontinuidade administrativa, etc. Muitas autarquias, nas últimas décadas, contraíram dívidas que têm como motivos principais: necessidade de obter recursos para investimentos em ampliação dos sistemas, falta de um padrão técnico adequado para atender a manutenção, inexistência de políticas operacionais otimizadas, etc. Devido ao

baixo padrão técnico, não conseguem obter recursos junto aos bancos, deixando os sistemas em situações caóticas.

No século XXI, além dos problemas financeiros, a disponibilidade de recursos hídricos à humanidade é um sério desafio a ser enfrentado pelo homem. Assim, desde já se faz necessário o incentivo ao desenvolvimento de técnicas para gerir os sistemas de maneira otimizada. Já não se pode, como no passado, confiar o conhecimento sobre os sistemas a algumas poucas pessoas. A documentação de processos, a desverticalização dos mesmos e o fim do corporativismo no funcionalismo são certamente os caminhos que a administração deve seguir. Os responsáveis pelas empresas de abastecimento têm mostrado receptividade ao diálogo com profissionais técnicos da área, tanto consultores como pesquisadores. Buscam-se soluções econômicas de projeto e também técnicas a serem aplicadas na operação dos sistemas com o intuito de alcançar diminuição de perdas físicas como também redução de despesas operacionais. Porém, em muitos casos, as empresas não podem oferecer os subsídios necessários para que os especialistas no assunto os auxiliem. Devido à falta de organização de dados cadastrais nos sistemas, vivemos, hoje, uma situação onde temos ferramentas de análise disponíveis, mas não temos dados suficientes e confiáveis para tais aplicações.

No início do desenvolvimento deste trabalho, promoveu-se uma série de visitas a empresas de abastecimento de água (públicas e privadas) com o intuito de dialogar com os gestores desses sistemas e, assim, reunir dados para modelagem e também interpretar os objetivos operacionais que têm os gestores. No decorrer do trabalho de pesquisa, verificou-se que os gestores dos sistemas de saneamento ainda encontram muitos conflitos no ambiente da empresa tanto para a gerência de serviços rotineiros como para a implementação de técnicas para operação otimizada de seus sistemas. Diante dos cenários encontrados, durante as visitas às empresas, procurou-se estabelecer contatos com associações que congregam os profissionais responsáveis pela gestão desses sistemas e também com as associações (ABES, ABRH e

ASEEMAE) com a finalidade de caracterizar melhor as dificuldades encontradas e observar se os problemas têm natureza sistemática no contexto do Brasil.

2.2 Conhecimento do sistema

Toda e qualquer tentativa de planejamento da operação de um sistema requer o conhecimento de cada detalhe de seu conjunto, incluindo o cadastro do sistema, o qual deve ser conhecido e confiável, sem que haja a necessidade de verificação in loco. Para início do planejamento, faz-se necessário conhecer o mapa dos arruamentos da cidade, contendo o projeto da rede com sua topologia, onde seja possível identificar a existência de acessórios como válvulas, "boosters", tubos, reservatórios, etc. Também é necessário conhecer as demandas nos nós, bem como o perfil de demanda ao longo do dia e ao longo da semana. No entanto, verificam-se que, na maioria das cidades brasileiras, essas informações não estão bem organizadas e normalmente apresentam um cadastro desatualizado e incompleto. Nas várias visitas realizadas a empresas de saneamento, abrangendo cidades de pequeno, médio e grande porte, verificou-se, nas cidades de maior porte, uma melhor organização dos dados cadastrais das redes. Já, nas pequenas cidades, os profissionais responsáveis, rotineiramente, não cadastram as alterações nos sistemas, dificultando que o trabalho seja realizado por outros, talvez por corporativismo, ou mesmo pelo desconhecimento dos benefícios que um banco de dados atualizados pode proporcionar, agilizando e tornando mais eficiente e econômico qualquer intervenção no sistema. É comum, nas pequenas cidades, haver uma pessoa que trabalha na manutenção do sistema há décadas e parece ser um profissional que tem o cadastro da rede em sua mente, vindo dele respostas a perguntas sobre detalhes da rede, tais como: Como é determinada ligação? Quando foi realizado determinado serviço? Qual o material e diâmetro de um tubo do sistema? Assim, toda vez que um dado necessita ser obtido, questiona-se alguém com esse perfil. Mas até quando informações deste tipo serão suficientes? Na maioria das vezes, tais procedimentos provocam problemas com o passar do tempo. Além da prática de "propriedade e fornecimento seletivo de informações", esses profissionais, inevitavelmente, vêm a

falecer. Nessas circunstâncias, os dados da rede hidráulica, toda alterada em sua configuração inicial de projeto, tornam-se desconhecidos.

Quando ocorre a abertura de novos projetos imobiliários, os órgãos públicos exigem os projetos pertinentes e dentre eles, o projeto hidráulico. Nesse projeto, definem-se: capacidade dos reservatórios, cotas geométricas dos pontos, diâmetros e comprimentos das tubulações, localização de acessórios como válvulas, "boosters", etc. Com o passar do tempo, as redes e adutoras certamente passarão por manutenções que, na maioria das vezes, exigem ações emergenciais, as quais têm predominância sobre as ações preventivas. O pessoal do departamento de manutenção toma as medidas que solucionam o problema no sistema de maneira mais rápida e econômica, quase sempre sem consultar o departamento de projeto e, por conseqüência, não alterando o setor de cadastramento do sistema. Assim, em muitos casos, os reservatórios têm seus níveis operacionais alterados; novas ligações são anexadas às redes, mudando, até mesmo, a topologia do sistema, sem as devidas alterações cadastrais, ficando registrado somente na mente dos executores dos serviços.

Com o advento da microinformática e da disponibilidade de softwares gráficos, muitas prefeituras e empresas de saneamento têm adotado os SIGs (Sistemas de Informações Georeferenciadas). Porém, observa-se, em muitas cidades onde o sistema foi implantado, que o objetivo não foi além da digitalização dos mapas existentes ou serviços de aerofotogrametria. Assim, não se verifica contribuição alguma para a recuperação de dados cadastrais dos sistemas, quando muito, fazem apenas uma atualização dos cadastros, quando alguns pontos da rede entram em manutenção e podem ser medidos e observados.

2.3. Problemas na estrutura organizacional das empresas

Na maioria das vezes, as falhas no sistema de cadastramento advêm da estrutura organizacional adotada pela empresa. Não existe uma documentação ou um

conjunto de normas para processamento de informações dentro da empresa, que garanta um fluxo de informações adequado.

No esquema organizacional observado na maioria das empresas de abastecimento urbano de água de pequeno porte, nota-se que o presidente desempenha, principalmente, um papel político, procurando fazer as articulações entre as carências da cidade e o diálogo com seu corpo técnico. Os trabalhos são divididos e realizados entre os departamentos. Embora executando bem cada qual a sua tarefa, evidenciam-se deficiências na articulação de tarefas e informações interdepartamentais, conforme se discute adiante.

Alguns aspectos que podem ser decorrentes da estrutura organizacional adotada pelas empresas de saneamento são:

a) O setor responsável pela aprovação de projetos e, em muitos casos, pela confecção dos mesmos, geralmente trabalha bem sua função, que é atender ao crescimento da cidade, elaborando novos projetos de redes, adutoras, reservatórios, ETAs, etc. Normalmente, utilizam ferramentas adequadas para cálculo, obedecem às normas técnicas, mas não procuram e nem recebem informações importantes dos demais departamentos como a manutenção e a operação. Uma melhor interação entre os departamentos poderia levar o sistema à economia de custos com manutenção, uma vez que os projetos poderiam evitar alguns problemas de manutenção e, também, colaborar com itens no projeto para facilitar a operação, como é o caso de implantação de válvulas e "boosters" em pontos estratégicos;

b) Por outro lado, o pessoal do departamento de manutenção procede às manutenções não somente substituindo peças danificadas, mas fazendo alterações na rede sem critérios técnicos, criando novas ligações e substituição de tubos com diâmetros diferentes. O pior é que essas alterações, na maioria das vezes, não são cadastradas, inviabilizando qualquer tentativa de aplicação de uma regra operacional advinda de modelos computacionais de otimização. Com essas falhas de atualização cadastral, as reabilitações dos sistemas também ficam muito prejudicadas;

c) O pessoal do departamento operacional, por não possuir uma base de dados confiável, na maioria das vezes não desempenha o seu papel principal, que seria a obtenção de regras operacionais otimizadas ou atendimentos de emergência em tempo real. Eles acabam trabalhando como um setor de tele-atendimento, recebendo reclamações dos usuários e limitando-se a contornar problemas de falta d'água e passando informações ao setor de manutenção.

Na Figura 2.1, apresenta-se um esquema organizacional simplificado de empresas de saneamento, onde se evidencia a falta de relacionamento horizontal entre os departamentos.

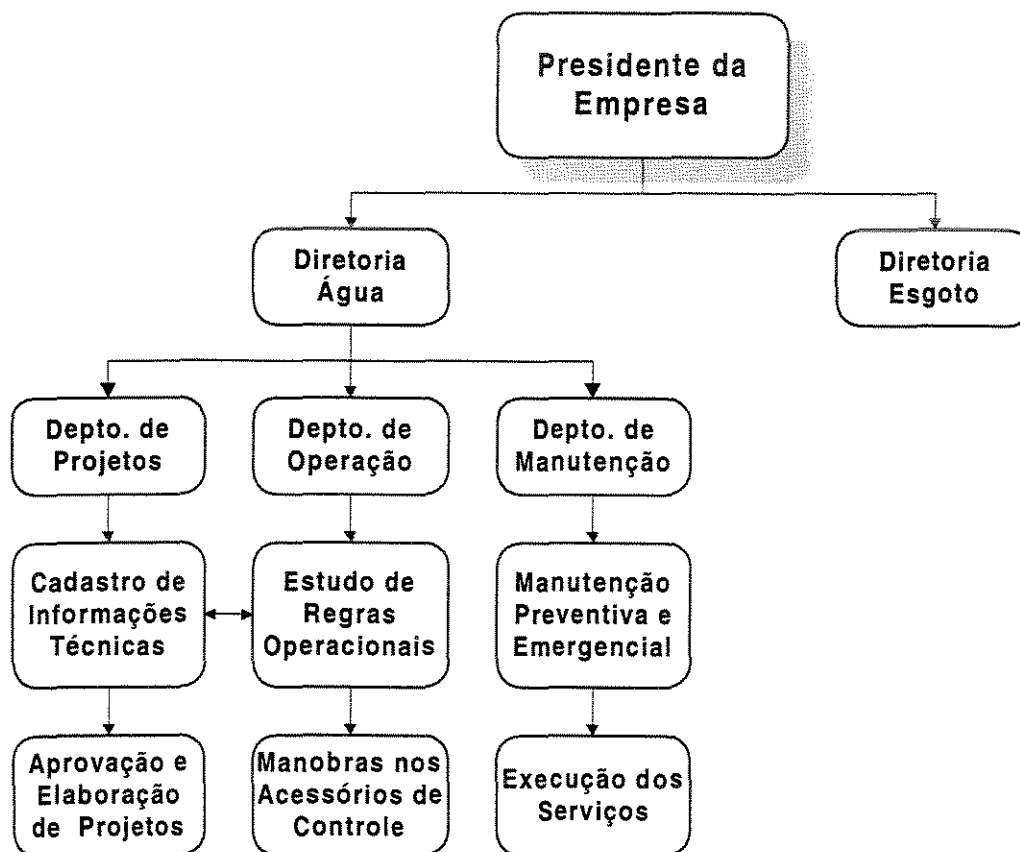


Figura 2.1 – Esquema organizacional simplificado das empresas

Da experiência obtida nos contatos com as empresas, propõe-se um esquema organizacional simplificado que privilegia uma interação entre departamentos propiciando uma facilidade na produção e recuperação de informações. Também,

verifica-se uma ação direta sobre os problemas e a tomada de decisões em conjunto, colaborando para futuras ações de cada departamento. O esquema organizacional proposto é apresentado na Figura 2.2

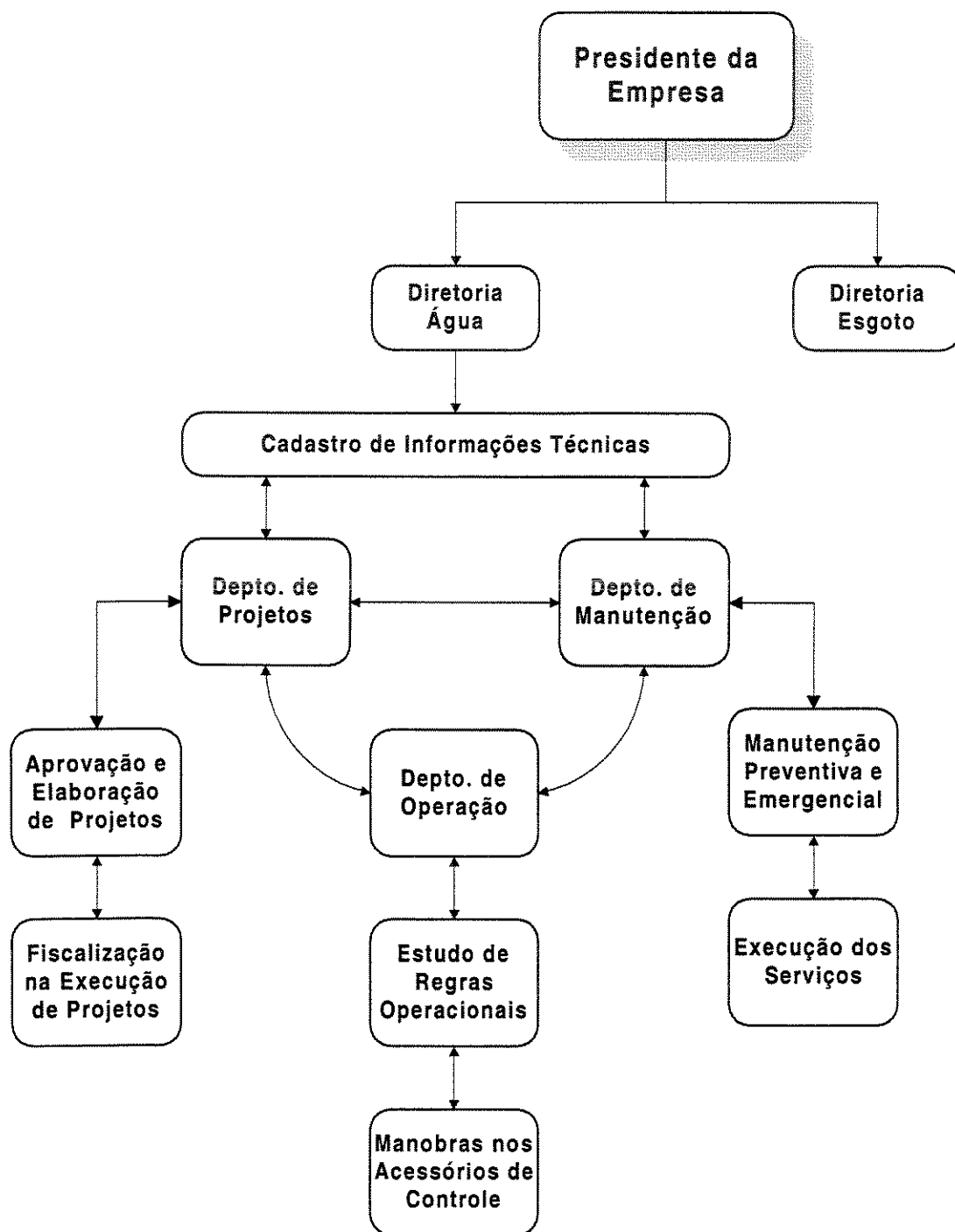


Figura 2.2 – Esquema organizacional simplificado das empresas com interação nas decisões entre departamentos

2.4. Gestão de pessoas na era da informação

Com tantas mudanças, as empresas necessitam posicionar seus recursos humanos na nova configuração do mercado global. Nos últimos anos, as relações no ambiente de trabalho da empresa passaram e continuam passando por diversas mudanças, decorrentes do desenvolvimento da tecnologia. Essa reforma reflete diretamente na atuação dos recursos humanos, que ficam frente a frente com o desafio imposto pela nova realidade.

Um primeiro caminho a ser trilhado pelas empresas é investir nos processos, principalmente no campo operacional, para garantir os resultados, mas não se deve esquecer na conta do capital intelectual, os valores realmente produtivos, as pessoas. Ainda hoje, grande parte das empresas tem um perfil que dá pouca importância à gestão dos seres humanos. Viver nessa realidade arcaica faz com que boa parte das organizações ainda conviva com a figura envelhecida do "departamento de pessoal", estrutura que utiliza parte das tecnologias apenas para automatizar atividades burocráticas como folha de pagamento, premiações e cálculos salariais. Porém, ficaram de fora os programas de gestão de estrutura organizacional, políticas de benefícios, prêmios relacionados ao desempenho, planejamento de treinamento e desenvolvimento, entre tantas outras atividades, restringindo-se assim o espaço para uma ação mais estratégica.

2.5. A administração dos serviços nas empresas de abastecimento

De uma maneira geral, os profissionais envolvidos no dia-a-dia de uma empresa de abastecimento urbano de água seguem a orientação de seu chefe imediato, que por sua vez, na maioria das vezes, aprendeu o trabalho com seu ex-chefe e certamente ganhou vícios com o passar do tempo. Essa prática põe a empresa numa situação onde não há definição de metas, não existe um manual de procedimentos, não existe padronizações, nem tão pouco o treinamento adequado e extensivo ao conjunto do pessoal.

Observou-se, durante as visitas, que as empresas, geralmente, não têm metas a serem cumpridas e, portanto, não vêm com clareza seus problemas. Se não há nenhum objetivo a ser alcançado, não há como saber o que deve ser corrigido. Portanto, um primeiro estágio para um planejamento adequado é a definição de metas, que devem ser conhecidas da presidência da empresa ao responsável pela limpeza.

Durante nossas visitas, colocamos algumas questões, mas nunca obtivemos respostas claras, tais como: A empresa tem metas para um planejamento de operação e expansão do sistema? Essas metas são avaliadas e reavaliadas regularmente? Existem procedimentos definidos para atingi-las? Todos os setores envolvidos da empresa têm conhecimento dessas metas?

Definir onde estão os problemas da empresa é essencial para que seja possível corrigi-los. Mais precisamente, seria necessário detectar os gargalos percorridos pelo fluxo de informações no sistema, identificando onde a informação se perde, torna-se lenta ou é adulterada. A empresa pode carecer de um processo de planejamento que norteie seu foco, seus processos prioritários, seu programa de investimentos e seu procedimento-padrão para execução da rotina diária de trabalho.

Planejar e organizar a empresa a partir de um diagnóstico é o caminho para que ela comece a ser eficiente e eficaz. Desse modo, será possível definir os pontos falhos da empresa, os processos produtivos que devem ser aperfeiçoados e as novas ações que a empresa deve realizar. A razão da existência de qualquer empresa não é o seu produto, mas o seu cliente. É ele quem consome o produto da empresa. Portanto, é dele que a empresa depende para sobreviver. É por meio da troca de informações com o cliente e do pronto atendimento de suas necessidades que a empresa terá êxito. Implantar um modelo de gerenciamento da comercialização de serviços que sistematize as suas relações com o cliente, aliado ao treinamento da equipe, é uma boa opção para a empresa começar a mudar. Assim, a empresa de abastecimento não se limita a vender água e, sim, o produto água com qualidade e com um preço coerente.

2.6. Alguns progressos do cenário nacional

Em SNIS (2000) destacam-se alguns progressos importantes como: crescimento das redes de água e esgotos nos últimos anos, sendo que os serviços de abrangência regional alcançaram índices de 3,5% e 3,6% respectivamente, já os serviços locais o crescimento é mais expressivo chegando a 15,4% e 23,4% respectivamente. No que se refere ao desempenho das empresas prestadoras de serviços, ressalta-se a melhoria de alguns indicadores importantes como: o índice de produtividade do pessoal (variando de 4,7 para 4,0 o número de empregados para cada mil ligações de água), representando um aumento da produtividade; outro indicador importante foi a redução nas perdas em faturamento (redução de 7,5% nos últimos anos). Mais importante que os números dos indicadores é a melhoria que se verifica quando da análise de séries históricas. Um aspecto negativo a registrar segundo o SNIS (2000) é a queda no nível de investimentos nos últimos anos. Quanto à evasão de receitas (receita não arrecadada em relação ao faturado), observa-se, no panorama nacional, uma variação de 3,9% na região Sul a 27,6% na região Norte, com uma média nacional de 12,9%. Conforme SNIS (2000) empresas como a SANEAGO-GO, CASAN-SC, SANESUL-MS, COPASA-MG, CORSAN-RS e SANEPAR-PR apresentam indicadores abaixo de 5%, enquanto que a CAERD-RO situa-se no outro extremo com 43,3%. Quanto ao índice de perdas de faturamento SNIS (2000) apresenta uma média nacional igual a 38,1%. Visualizando as empresas observa-se o melhor índice na CAESB-DF (20,9%) e COPASA-MG (25,3%) e o pior índice na CAESA-AP (68,7%). Observa-se que os índices individuais das empresas continuam, na sua maioria, com valores ainda elevados.

A SABESP, por meio de suas áreas de Tecnologia da Informação e Auditoria, começou a discutir e planejar as ações para enfrentar os efeitos das mudanças advindas do mercado globalizado desde 1996. Em março de 1998, foi iniciada a estruturação do projeto, visando à adequação de sistemas, instalações e equipamentos. Com o objetivo de reduzir o risco de falhas operacionais internas ou externas que

venham a impactar a prestação de serviços, um completo plano de procedimentos de contingência foi desenvolvido, e poderá ser ativado em situações emergenciais.

Conforme apresentado em SNIS (2000), a produtividade dos serviços de abastecimento regionais com mais de 400 mil economias é maior que a dos serviços locais, evidenciando uma relação direta entre tamanho e produtividade do pessoal. Porém, as despesas por m³ de água produzido são maiores nas empresas regionais. Segundo CASTRO (1999), em 1996, a EMBASA - Empresa Baiana de Águas e Saneamento iniciou a implantação de um modelo de gestão gerencial onde o essencial era não perder de vista os objetivos da corporação. No caso, atender às comunidades com água de qualidade e na quantidade adequada com custo mínimo.

COSTA e MOURA (1999) apresentam um trabalho desenvolvido para o processo de operação do sistema de abastecimento de água da SANESUL, onde se empregou a estratégia de educação no projeto de planejamento e controle da qualidade. Focaram-se, inicialmente, os fatores que contribuíram para a formulação da estratégia, pois a experiência da área de educação e desenvolvimento da SANESUL foi fundamental para determinar a melhor direção das ações desenvolvidas.

2.7. Conclusão

Conclui-se, dessa breve revisão, que o setor de saneamento necessita de uma padronização de seus procedimentos, não somente com a implementação de softwares cadastrais e de mapeamento e, sim, com a documentação da rotina da empresa para que se tenha uma memória documentada de todo sistema. A documentação deve existir desde a concepção dos projetos até as reformas e reestruturações do sistema para atender a demanda. Com a padronização, ganha-se a possibilidade de implementação de regras operacionais otimizadas do sistema, pois conseguem-se dados confiáveis para a modelagem e viabilidade de implementação. Investir na capacitação dos funcionários também deve ser prioridade, pois um padrão técnico mínimo é indispensável para qualquer setor da empresa de abastecimento.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A preocupação com o planejamento da operação dos sistemas urbanos de abastecimento de água ganhou destaque nas últimas décadas, principalmente nos países desenvolvidos onde o crescimento industrial é expressivo. A complexidade dos sistemas acompanhou o crescimento da demanda e, assim, surgiram dificuldades operacionais. Na tentativa de gerir os sistemas, houve a necessidade da aplicação da análise de sistemas como ferramenta de apoio para que os operadores pudessem tomar decisões de maneira estruturada.

3.1 O Uso da Análise de Sistemas na Engenharia de Recursos Hídricos

A análise de sistemas faz uma estruturação do processo de solução do problema, dentre um grande número de alternativas factíveis para a solução do mesmo. Procura a solução que melhor atende aos objetivos globais, respeitando restrições como: disponibilidade de recursos naturais, disponibilidade de recursos financeiros, aspectos políticos, sociais, etc.

A aplicação da análise de sistemas na engenharia de recursos hídricos é um campo relativamente novo e vem-se aprimorando paralelamente ao desenvolvimento dos recursos computacionais, haja vista que os grandes sistemas necessitam de análises complexas, envolvendo muitas variáveis, praticamente impossíveis de serem efetuadas sem o uso de algoritmos matemáticos, implementados por meio de um código computacional.

Muitas áreas do conhecimento estão envolvidas na análise de sistemas aplicada a recursos hídricos, equacionando variáveis de natureza distinta, tais como: engenharia, economia, sociologia, etc. Atualmente, com a possibilidade da execução de algoritmos matemáticos complexos em computadores pessoais, os profissionais podem detalhar os sistemas de maneira mais precisa, ficando mais próximo o equacionamento matemático da situação física real. Desse modo, pode-se dedicar mais tempo à análise da consistência dos resultados, estudo de novas formulações, rearranjo dos sistemas, medidas de reabilitação, etc.

Um fator complicador para a análise de sistemas de recursos hídricos é o grande número de variáveis necessárias para que haja uma representação física precisa do problema. Em muitos casos é preciso um processo de decomposição que proporcione a divisão de sistemas em subsistemas gerenciáveis. Outros problemas são os objetivos incomensuráveis ou não-quantificáveis precisamente.

O uso de recursos da análise de sistemas, em contrapartida às ferramentas tradicionais, geralmente conduz a uma melhora substancial em projetos, planejamento e operação de sistemas. Segundo SIMONOVIC (1998), é comum encontrarem-se ganhos de até 30% que se traduzem em uma enorme economia nos grandes empreendimentos, na ordem de dezenas ou centenas de milhões de dólares.

A aplicação da análise de sistemas não necessariamente resolve os problemas operacionais do sistema em estudo, mas monta uma estrutura de análise para a tomada de decisão, permitindo ao decisor experimentar a resolução de um problema numa maneira lógico-racional. SIMONOVIC (1998) menciona que a aplicação da análise de sistemas deve seguir as seguintes etapas, para que se obtenha uma resposta eficaz:

- Definição do problema;
- Reunião dos dados envolvidos;
- Desenvolvimento de critérios para a avaliação de alternativas;

- Formulação de alternativas;
- Avaliação das alternativas;
- Seleção da melhor alternativa;
- Plano de implementação.

Em muitos casos, alguns desses passos são realizados quase que simultaneamente, facilitando uma retroalimentação da análise, contribuindo para aumentar a velocidade de obtenção de respostas.

A formulação de metas e objetivos é alvo de um planejamento e devem ser consistentes com restrições políticas, sociais, ambientais, econômicas, tecnológicas e estéticas. Os objetivos representam os caminhos pelos quais as metas podem ser alcançadas. Assim, a tarefa do engenheiro de recursos hídricos é modificar as variáveis controláveis ou parcialmente controláveis de um sistema para, então, maximizar os resultados desejáveis e minimizar os resultados indesejáveis.

Ultimamente, a engenharia hidráulica vem-se preocupando em obter melhores resultados com o planejamento da operação dos sistemas, trabalhando com técnicas de modelagem para que se possa representar uma rede hidráulica real dentro de um sistema de equações matemáticas, que apresentem relações lógicas entre si.

As técnicas de planejamento e operação de sistemas de abastecimento de água vêm sendo utilizadas há algum tempo em muitos países, principalmente devido à escassez de recursos hídricos, como é o caso da França, Alemanha, etc. Esses países, além de necessitarem de técnicas de distribuição eficiente da água, também necessitam de políticas de controle e adequação ao consumo.

Na tentativa de redução de custos operacionais em um sistema de distribuição de água para Austin, Texas, BRION e MAYS (1991) testaram um modelo de otimização e simulação conseguindo, com uma política otimizada de bombeamento,

uma redução de 17,3% no custo operacional que vinha sendo realizado até então (modelo PMPOPR - Pump Operation).

ORMSBEE e REDDY (1995) aplicaram um algoritmo de otimização em Washington-DC e obtiveram resultados significativos com a política fornecida pelo modelo, observando uma redução de 6,9% nos custos com energia elétrica.

LUVIZOTTO JUNIOR (1995) estabeleceu rotinas de simulação computacional destinadas a auxiliar na gestão operacional de sistemas de abastecimento de água. VENTURINI (1997b) aplica um modelo de otimização mono-objetivo a uma rede hidráulica de abastecimento público de água, formulando políticas horárias de operação.

O recurso água é usado para um grande número de objetivos como: abastecimento de água para uso doméstico, abastecimento de água para o setor industrial, geração de energia elétrica, irrigação, navegação, etc. Muitos dos projetos de recursos hídricos do passado atentavam somente para um único objetivo. Atualmente, os projetos com esse enfoque estão cedendo lugar aos projetos de múltiplos objetivos, em que muitos objetivos competem, entre si, pelos mesmos recursos. SIMONOVIC (1998) assinala que os projetos que são desenvolvidos para um único objetivo, mas que produzem alguns benefícios para outros objetivos, não devem ser considerados como projetos que atendem a múltiplos objetivos, pois os demais objetivos são atendidos somente quando há excedente de recurso no sistema. Planejamento e gerenciamento com múltiplos objetivos em recursos hídricos envolvem mais que uma simples combinação de elementos, mas sim uma análise de conflitos entre os objetivos. Os recursos são necessariamente limitados e existem muitos conflitos devido aos interesses adversos entre os usuários.

3.2 A Modelagem da Operação de Sistemas de Abastecimento de Água

A modelagem da operação de sistemas de abastecimento de água vem-se tornando alvo de pesquisa teórica e aplicada nos centros de pesquisa dos países que se deparam com o problema de escassez de recursos hídricos, ou que apresentam uma consciência ecológica de uso racional do recurso. No Brasil, principalmente na última década, alguns grupos de pesquisa vêm-se dedicando ao tema e assim desenvolvendo modelagens de apoio aos gestores de sistemas.

Nos últimos anos, as técnicas de pesquisa operacional vêm ganhando papel de destaque na análise dos sistemas de recursos hídricos, pois possibilitam uma modelagem mais realística dos problemas, viabilizando a solução em microcomputadores.

Os modelos matemáticos são também representações idealizadas e são expressos por meio de termos e símbolos matemáticos, formando equações e inequações. O conjunto de equações e inequações matemáticas do modelo reproduzem a essência do problema. A análise de redes hidráulicas malhadas foi sistematizada inicialmente por CROSS em 1936 que propôs um método iterativo de cálculo manual (atualmente disponível em programas computacionais), que se tornou amplamente conhecido como "*MÉTODO DE HARDY-CROSS*", sendo utilizado até hoje.

Existem muitos trabalhos na literatura que representam a modelagem dos sistemas de abastecimento de água, porém são desenvolvidos para a análise de projetos de redes hidráulicas, como o Método da Teoria Linear (WOOD e CHARLES, 1972). Somente nas últimas décadas, é que se verifica uma preocupação com a operação dos sistemas, bem como a operação em condições particulares como é o caso de emergências, situações de déficit, panes no sistema, racionamento de energia, etc. Os trabalhos de otimização em redes hidráulicas têm formulado, principalmente, a minimização de custos com bombeamento, não dando merecida

atenção para outros objetivos. Para a modelagem da operação dos sistemas, são utilizadas técnicas de pesquisa operacional e, dentre elas, podem-se destacar a programação linear, a programação não-linear, a programação inteira mista, a programação dinâmica, a simulação, a otimização de fluxo em redes e combinações entre as técnicas. ORMSBEE e LANSEY (1994) analisam as principais técnicas de modelagem, destacando as principais contribuições para o estudo de sistemas de abastecimento.

JARRIGE (1993) assinala que muitos modelos matemáticos têm sido sugeridos para a solução de problemas de abastecimento, tendo como compromisso uma execução em tempo aceitável e que apresente uma acurácia razoável do sistema.

SIMONOVIC (1998) ressalta ainda que os modelos matemáticos apresentam três valiosas funções para a análise de sistemas em recursos hídricos:

- a) Amplificação: O uso de modelos pode amplificar os conhecimentos disponíveis de um sistema complexo. Eles não produzem a informação, mas permitem sistematizar o tratamento da mesma;
- b) Organização: O modelo é capaz de ajudar a organizar as decisões em termos simples mesmo contendo numerosas características de sistemas complexos;
- c) Avaliação: Se incorporarmos algumas medidas de desempenho de sistemas nos modelos, eles podem fazer comparações entre soluções.

Assim, os modelos matemáticos para a análise de recursos hídricos são essencialmente ferramentas para subsidiar os julgamentos, intuições e experiências dos profissionais da área de recursos hídricos.

As decisões num problema são representadas pelas variáveis de decisão. Desse modo, a medida do desempenho do modelo é função dessas variáveis, conhecida como função-objetivo.

Para a aplicação de uma modelagem matemática em um problema, faz-se necessário o estabelecimento de relações lógico-matemáticas, a fim de representar o problema físico como um problema matemático. Essas condições são alcançadas por meio do estabelecimento de restrições que a solução deve respeitar e os objetivos que a solução deve focar. A solução procurada é traduzida por meio do valor obtido nas variáveis de decisão.

Contudo, deve-se tomar cuidado especial da formulação do problema e também na análise e interpretação dos resultados, reavaliando as hipóteses assumidas em confronto com os resultados ótimos obtidos. BRION e MAYS (1991) lembram a necessidade de se fazer uma análise de sensibilidade para excluir a possibilidade de ótimos locais ao invés dos ótimos globais.

ORMSBEE e REDDY (1995) relatam que, nos últimos anos, a modelagem de sistemas de abastecimento de água tem dado ênfase para o uso integrado on-line de computadores e tecnologias de controle para impor operações em tempo real. Entretanto, verifica-se que a modelagem da operação em tempo real ainda é acompanhada de uma modelagem previamente executada.

A previsão de demanda é um passo fundamental para que se possa obter uma política de operação do sistema de abastecimento, principalmente para operações em tempo real. Segundo ORMSBEE e LANSEY (1994), a previsão de demanda deve empregar três passos, que são: a previsão de demanda diária, a demanda distribuída espacialmente associada aos nós da rede e a distribuição de demanda durante o horizonte de planejamento (ex: 24 horas). Notando a lacuna existente nos modelos de previsão de demanda, ZAHED FILHO (1990) propôs um modelo que visa atender três requisitos básicos: (a) previsão de resultados compatíveis com desvios aceitáveis de

operação, (b) facilidade de processamento, (c) flexibilidade de implementação de correções.

A modelagem da operação dos sistemas de abastecimento de água visa obter uma política de operação que, segundo ORMSBEE e LANSEY (1994), nada mais é do que um grupo de regras que agendam e indicam quando as bombas devem ser ligadas ou desligadas; quais as porcentagens de abertura das respectivas válvulas de controle; qual a política de esvaziamento e enchimento dos reservatórios, etc. As regras são formuladas para um dado horizonte de planejamento subdividido em intervalos discretos de operação.

As estratégias de controle operacional podem ser locais ou central e são muito variadas e dependem de alguns fatores como: complexidade do sistema e disponibilidade de recursos técnicos e financeiros. Segundo ZAHED FILHO (1990), o controle automático dos sistemas demonstra, em certos casos, a redução de custos operacionais e aumenta a segurança e confiabilidade, permitindo obter dados essenciais para o planejamento futuro do sistema.

Muitas empresas de saneamento estão buscando o uso do *Supervisory Control and Data Acquisition* (SCADA), objetivando uma melhora na operação de sistemas de bombeamento no abastecimento de água. Esses sistemas permitem o monitoramento de pressões e velocidades por meio da rede de abastecimento, operando elementos de controle (válvulas, “boosters”) de um local central.

Em junho de 1985, foi realizada uma conferência em Nova Iorque com o título de “*Computer in Water Resources*”, mais precisamente as seções denominadas “*The Battle of the Network Models*”, tendo como objetivo a comparação entre resultados obtidos por vários modelos desenvolvidos sobre uma rede hipotética previamente disponibilizada. WALSKI (1987) procede a uma análise dos resultados obtidos e conclui que os problemas de otimização de sistemas de distribuição de água devem ser resolvidos utilizando modelos matemáticos em conjunção com cálculos manuais e

julgamentos de engenharia, uma vez que as decisões puras fornecidas pelos modelos são ótimas na perspectiva da modelagem matemática, mas em alguns casos, difíceis de serem implementadas no ambiente da empresa.

3.3 Classificação dos Modelos Matemáticos para Análise de Sistemas de Recursos Hídricos

Dependendo da natureza do relacionamento matemático entre os termos que compõem a função-objetivo e as restrições, o modelo pode ser classificado como:

- a) Linear: A função-objetivo e todas as restrições são funções lineares das variáveis de decisão;
- b) Não-linear: A função-objetivo ou algumas das restrições não apresentam relações lineares com as variáveis de decisão.

Quanto à incerteza sobre as variáveis ou parâmetros, os modelos podem ser classificados como de:

- a) Natureza Determinística: Se cada parâmetro ou variável pode ser assumido como um valor fixo definido ou valores fixados para um dado cenário de condições;
- b) Natureza Probabilística / Estocástica: Contêm variáveis ou parâmetros sujeitos a incertezas no futuro, independentes do passado.

Quanto à continuidade das soluções, os modelos podem ser classificados como:

- a) Contínuo: As variáveis são contínuas e assim, a solução pode assumir valores intermediários, geralmente fornecidos pelo modelo de otimização;

b) Discreto: Neste caso as soluções já estão descritas a priori, o que se faz é uma seleção dentre o conjunto de soluções discretas.

Além dessas classificações, o modelo recebe uma classificação segundo a variabilidade ou não ao longo do tempo:

- a) Estático: Nesse tipo de modelo, as variáveis ou parâmetros não têm variabilidade temporal, não sendo necessário portanto a consideração do tempo na formulação do modelo;
- b) Dinâmico: As variáveis têm dependência temporal, as quais têm que ser implementadas no modelo.

3. 4 Técnicas de Pesquisa Operacional

3.4.1 Simulação de Sistemas

A simulação pode ser definida como uma técnica em que se faz representação com analogias, conservando características físicas ou lógicas dos sistemas, tentando tirar conclusões por meio do modelo formulado. No caso dos modelos de simulação para análise de sistemas em recursos hídricos, a analogia é do tipo lógica, por meio de equações matemáticas que expressam as relações entre o mundo real e o modelo matemático. Os modelos de simulação fazem uma representação de um sistema para prever os possíveis resultados de sua operação sob um dado conjunto de condições iniciais e de regras operativas.

As técnicas de simulação de sistemas também são eficientes para a avaliação de alternativas, estudos de possíveis configurações de sistemas, especialmente na fase de projeto, pois, nesses casos, é muito complicado obter uma expressão analítica que reflita o comportamento do sistema.

Atualmente, com o advento dos computadores e especialmente os recursos de micro-informática, a simulação passou a ser ainda mais atraente, devido à facilidade e agilidade nos processamentos, permitindo a mudança rápida na configuração de sistemas e assim permitindo comparações. TAHA (1987) salienta que o sucesso da simulação em modelagens advém dos expressivos avanços dos computadores digitais, sendo difícil pensar no sucesso da simulação sem o uso do computador. A simulação difere da otimização por não apresentar natureza otimizante, mas sim descritiva.

A procura por uma solução ótima não é o objetivo direto da simulação, pois ela é extraída a partir de um grupo de possíveis resultados e respectivas variáveis de decisão. BARBOSA (1997b) assinala que o interesse no uso da simulação é obter uma descrição geral do sistema e uma avaliação de seu comportamento a partir de diferentes condições. Um modelo de simulação não é capaz de gerar uma solução ótima para um problema, mas ao fazermos várias tentativas com o modelo e políticas de decisões alternativas, pode-se detectar uma solução ótima ou próxima desta.

O modelo de simulação deve ser avaliado e calibrado por meio de resultados particulares, conhecidos pelas respectivas variáveis de entrada. Nesse procedimento, são ajustados os parâmetros de processamento do sistema em análise. Devido à extensão substancial dos programas e ao grande número de dados de entrada e de saída, observa-se uma certa dificuldade para escrever, testar e executar os mesmos.

Na literatura, é possível observar uma quantidade considerável de experiências bem sucedidas com modelos de simulação em recursos hídricos, os quais têm sido rotineiramente aplicados por muitos anos em agências de desenvolvimento e planejamento de recursos hídricos. LUVIZOTTO JUNIOR (1995) elaborou em seu trabalho rotinas de simulação para o controle operacional de redes hidráulicas, implementando o método elástico para cálculo de transientes hidráulicos.

3.4.2 Otimização de Sistemas

Assim como as técnicas de simulação, as técnicas de otimização vêm sendo incorporadas progressivamente ao setor de recursos hídricos, devido, principalmente, às facilidades computacionais disponíveis nos dias atuais e à possibilidade de modelagem mais realística dos problemas. As técnicas de otimização enquadram-se num ramo da matemática conhecido como “programação matemática”.

Os problemas de otimização apresentam uma estrutura clássica, em que se procura maximizar ou minimizar uma função-objetivo, respeitando sempre um conjunto de uma ou mais equações ou inequações conhecidas por restrições. A função-objetivo e as restrições envolvem as variáveis de decisão, variáveis de estado e os parâmetros de processamento. A função-objetivo representa uma forma de medir o desempenho do modelo especificado pelos valores das variáveis de decisão. O grupo de variáveis de decisão define como o sistema será operado, ou seja, define como será a manobra nas válvulas, como será o funcionamento do conjunto de bombas e “boosters”, níveis d’água nos reservatórios, etc. ORMSBEE e LANSEY (1994) assinalam que as restrições para problemas de sistemas de abastecimento de água podem ser divididas em três grupos:

- a) Limitações físicas dos sistemas (capacidade dos reservatórios, capacidade dos mananciais, configuração das bombas, etc);
- b) Leis físicas (conservação da massa nos nós da rede, conservação da energia nos anéis, etc);
- c) Requerimentos externos (definição da demanda, manutenção aceitável dos níveis de pressão, etc).

Ao resolver o problema matemático, o algoritmo de otimização visa encontrar, dentre as soluções factíveis, a solução ótima, ou seja, a solução que atinja o ótimo

respeitando critérios preestabelecidos. Os modelos de otimização obtêm um cenário para um dado conjunto inicial de valores que atende de forma ótima à função-objetivo. Desse modo, fazendo-se uma comparação, os modelos de simulação são limitados a descrever o desempenho de um dado sistema (natureza descritiva) e os modelos de otimização procuram automaticamente por uma solução ótima (natureza otimizante).

As relações entre as variáveis presentes na função-objetivo e nas restrições podem definir a técnica de otimização mais indicada. Assim, temos vários algoritmos tais como: a programação linear (PL) para modelos que mantenham relações lineares entre suas variáveis; a programação não linear (PNL) para restrições ou função-objetivo não lineares e a programação dinâmica (PD) para casos onde as decisões são do tipo seqüencial, decompostas em estágios. Em alguns casos, o problema deve atender a mais de uma função-objetivo e, nesse caso, temos um problema de programação multi-objetivo. Cada uma destas técnicas pode ser aplicada em ambientes estocásticos ou determinísticos. Conforme YANG (1996), entre os trabalhos realizados na área, há uma preferência pela programação linear que pode ser explicada devido a algumas vantagens, tais como: adequação para o tratamento de problemas de grandes dimensões, obtenção de ótimos globais, não necessidade de uma política inicial e grande número de subrotinas já disponíveis. A programação linear (PL) tem sido considerada uma das técnicas mais usadas em análise de sistemas de recursos hídricos e um dos mais importantes avanços científicos da história recente. Ela é utilizada para resolver problemas em muitos outros campos como na indústria e na agricultura.

Para problemas que contêm não-linearidades, é possível contorná-las fazendo uso de processos iterativos. KESSLER (1989) menciona que o problema com equações não-lineares pode ser resolvido em dois estágios, onde, num primeiro estágio, parte das variáveis são consideradas constantes e outras são resolvidas pelo algoritmo de PL; no segundo estágio é empregado uma técnica de procura, com troca do restante das variáveis. Os estágios são repetidos iterativamente até que a solução ótima seja atingida segundo algum critério de convergência. Com essa decomposição,

o problema torna-se linear e a programação linear pode ser aplicada com sucesso. Segundo BARBOSA (1997b), sob certas hipóteses e com procedimentos iterativos, pode-se empregar a programação linear na solução de problemas que incluam relações não lineares. VENTURINI (1997a) aplica um modelo de otimização para redes hidráulicas implementando uma rotina de programação linear (MINOS 5.1) onde foi utilizado um algoritmo iterativo com recursos especiais para contornar problemas de não-linearidade presentes em diversas equações.

Uma das vantagens de resolver um problema por PL é a possibilidade do tratamento de problemas de grandes dimensões. Segundo BARBOSA (1997b), um indicador do porte do problema de PL é dado pelo número de restrições que ele apresenta, pois o esforço computacional varia com o cubo do número de restrições e apenas linearmente com o número de variáveis. Sendo assim, na maioria dos casos usuais, é vantajoso resolver os problemas em sua forma dual tentando diminuir a dimensão do problema.

A programação dinâmica decompõe os grandes problemas em uma série de subproblemas menores que são resolvidos recursivamente, caracterizando assim um processo de decisão multi-estágio. TAHA (1987) relata que, apesar das restrições reduzirem o esforço computacional na programação dinâmica, ela é afetada pela “praga da dimensionalidade” que é função das variáveis de estado. Sendo assim, para se obter uma solução eficiente do ponto de vista computacional, os problemas devem ter poucas variáveis de estado.

A programação dinâmica é dirigida para o tratamento de problemas que possam ser decompostos em estágios múltiplos (subproblemas), no tempo ou no espaço. Esses subproblemas apresentam um formato padrão e podem ser enquadrados em um método sistemático de solução. Para que tal formulação seja viável, é necessário que um dos subproblemas tenha solução simples e que haja relação funcional entre eles. Por exemplo, no caso de redes hidráulicas é necessário decidir sobre a seqüência de armazenamentos nos reservatórios a serem alocados no tempo, sendo

usual a adoção do armazenamento em cada reservatório como variável de estado. As soluções ótimas no algoritmo de programação dinâmica são conseguidas recursivamente através de uma relação de recorrência, respeitando a factibilidade a cada estágio.

Existe uma série de modelos de otimização que empregam a programação linear juntamente com a Programação Dinâmica para a solução de problemas de otimização, como exemplo é possível citar BRAGA et. al (1998) onde esta combinação de técnicas é utilizada para planejamento e operação de sistemas hidroelétricos.

Mais recentemente, a técnica de otimização de fluxo em redes vem sendo usada em pesquisas de operação e aplicações em engenharia de sistemas hidráulicos. Segundo AHUJA et al (1993), a otimização de fluxo em redes (Network Flow Optimization) é um caso particular em que se aplica a programação linear quando as restrições podem ser colocadas na forma de fluxo em redes, sendo um problema de fluxo a custo mínimo (PFCM).

A rede de fluxo é composta por arcos e nós, tendo a função objetivo para minimizar ou maximizar a somatória dos custos nos arcos. As principais restrições a serem respeitadas são o balanço de fluxo nos nós e os limites máximos e mínimos nos arcos. Como exemplo de modelo de simulação por fluxo em redes pode-se citar o MODSIM (LABADIE et. al, 1988), em que se faz uma aplicação à bacia do rio Piracicaba.

Existe um grande número de modelos que apresentam em sua formulação combinações de várias técnicas de otimização e simulação, geralmente trabalhando com programação linear nas partes em que os equacionamentos são lineares, programação dinâmica nas partes que envolvem decisões multi-estágios e simulações para a averiguação de alguns parâmetros.

Com tantas técnicas desenvolvidas no campo da otimização, o analista de sistemas de recursos hídricos tem maior agilidade e flexibilidade para a solução de problemas. Deve-se ter um cuidado especial na formulação do problema, bem como na aceitação de seus possíveis resultados.

3.5 A Otimização Multiobjetivo

Num processo de tomada de decisão, vários aspectos (econômicos, sociais, políticos, ambientais, etc) necessitam ser considerados simultaneamente. É raro uma decisão ser tomada em função de um único objetivo, até mesmo em processos corriqueiros como a compra de um eletrodoméstico. No setor de recursos hídricos, os processos decisórios envolvem múltiplos objetivos e múltiplos decisores, estabelecendo conflitos de interesse entre grupos com visões distintas acerca das metas a serem adotadas no planejamento e gestão de recursos hídricos. A otimização multiobjetivo veio na seqüência do desenvolvimento dos trabalhos com otimização. No início da aplicação das rotinas de otimização, qualquer benefício advindo da aplicação era interessante, uma vez que ganhos sensíveis eram notados. Porém, com o estudo de diversos objetivos operacionais que os sistemas devem atender, verificou-se que uma formulação mais abrangente necessitaria ser desenvolvida e assim ocorreram muitos avanços no campo da otimização multiobjetivo.

Na engenharia, muitas vezes, a concepção de um projeto ou sua operação deve atender a vários objetivos ou critérios. Se os objetivos são conflitantes, então o problema torna-se encontrar a melhor solução de compromisso com grau de satisfação dos objetivos em função da escolha do decisor. As técnicas de análise multiobjetivo ou multicriterial têm se revelado como recurso significativo de apoio à tomada de decisão, especialmente em problemas de interesse social. Em muitos problemas práticos, deseja-se atender a vários objetivos ou metas satisfazendo um conjunto de restrições impostas por condições físicas do sistema, limitações de recursos, condicionantes de ordem social, etc. A Programação Multiobjetivo ou Análise Multiobjetivo apresenta

atualmente uma ampla variedade de resultados e métodos destinados à aplicação em problemas que envolvam múltiplos objetivos.

Como exemplo de um problema de análise multiobjetivo, AZARM (1996) cita o caso do projeto de um automóvel, onde os projetistas têm como objetivos maximizar a resistência ao impacto no caso de acidentes e minimizar o seu peso para propiciar economia de combustível. Este é um caso típico onde os dois objetivos são oponentes, pois quando desejamos aumentar a resistência do automóvel, aumentamos também o seu peso próprio e, conseqüentemente, aumentamos o consumo de combustível.

A análise multiobjetivo procura tratar, em um processo de tomada de decisão, aspectos distintos simultaneamente. É muito raro que uma decisão seja tomada em função de um único objetivo, mesmo em situações corriqueiras do cotidiano doméstico, como a compra de um eletrodoméstico, a escolha de uma roupa, etc. Um economista de origem francesa e italiana chamado Pareto (1848-1923) foi quem primeiro desenvolveu o princípio da otimização multiobjetivo para uso em economia. Suas teorias tornaram-se conhecidas como "*conceito de otimalidade de Pareto*", a serem descritas adiante.

Um problema de otimização multiobjetivo pode ser resolvido de uma maneira similar a um problema mono-objetivo. Em um problema mono-objetivo, a idéia é encontrar um grupo de valores para as variáveis de decisão, que, sujeitas a um conjunto de restrições, resulte um valor ótimo para a função-objetivo. Em problemas multiobjetivo, procura-se encontrar valores para as variáveis de decisão que otimizem as funções-objetivo simultaneamente, desta maneira a solução é escolhida dentro de um grupo de soluções, chamado de soluções não-dominadas, ou ainda grupo de soluções ótimas de Pareto. Em geral, para problemas multiobjetivo a solução ótima obtida pela otimização das funções-objetivo individualmente não é uma solução factível para o problema multiobjetivo. MACHADO (1991) menciona que a Programação Multiobjetivo está relacionada com o estudo de problemas de otimização vetorial, isto

é, que envolvam mais de uma função objetivo. No caso de minimização, a formulação dessa classe de problemas é descrita como se segue:

Min $f(x)$

onde:

$$f(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x)) \dots \dots \dots (3.1)$$

Sujeito a:

$$g_i(x) \geq b_i$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

A região do espaço de soluções sobre a qual se situa a solução ótima do problema multiobjetivo é designada como região ótima de Pareto e é o campo de soluções no qual o decisor pode proceder sua escolha. COHON e MARKS (1975) concluem, no entanto, que essas soluções são equivalentes entre si, ou seja, podemos dizer que elas pertencem a um conjunto de soluções conhecidas como “Conjunto das Soluções não-Dominadas”. A equivalência diz respeito à impossibilidade de eleger uma solução como superior à outra, exceto se for considerada a estrutura de preferência do decisor.

Define-se *Ótimo de Pareto* como um grupo de soluções que são equivalentes entre si, ou seja, não existe uma solução que melhore um dos objetivos sem degradar um outro.

Segundo SIMONOVIC (1998), em problemas de otimização multiobjetivo a palavra otimização tem sido propositalmente mantida fora da definição, pois em geral não se pode otimizar um vetor de funções objetivo, uma vez que o ótimo de uma função não coincide com os pontos ótimos das demais funções. O conceito de solução “não-dominada” em análise multiobjetivo substitui o conceito de solução ótima em otimização mono-objetivo.

O primeiro passo para a solução de um problema multiobjetivo consiste em identificar o conjunto das soluções não-dominadas dentro da região de factibilidade. Assim, ao invés de selecionarmos uma solução ótima, selecionamos um conjunto de soluções não-dominadas. Uma solução factível de um problema multiobjetivo é dita não-dominada quando não existe outra solução que melhore um dos objetivos sem causar degradação nos outros. A Figura 3.1 ilustra uma situação onde se trata um problema multiobjetivo relacionado à operação de sistema de abastecimento de água, com três funções-objetivo a serem minimizadas: $\text{Min } \{F_1, F_2, F_3\}$. A superfície apresentada na Figura 3.1 define o conjunto das soluções não-dominadas para este problema.

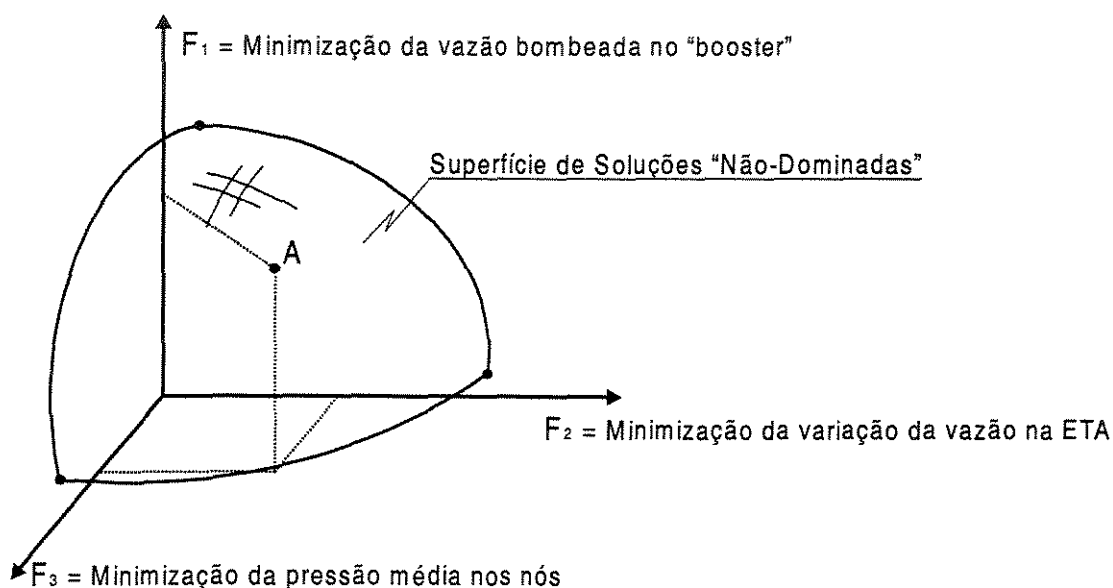


Figura 3.1 - Superfície de soluções não-dominadas

No processo de seleção da solução do problema multiobjetivo, é preciso identificar a possibilidade de interação com o decisor. CASOTTI (1993) evidencia que cada método multiobjetivo estabelece uma forma e um nível de interação com um decisor, responsável pela seleção final da solução do problema. Os métodos multiobjetivos mais eficientes operam de acordo com uma estrutura de dois níveis, mostrada a seguir na Figura 3.2:

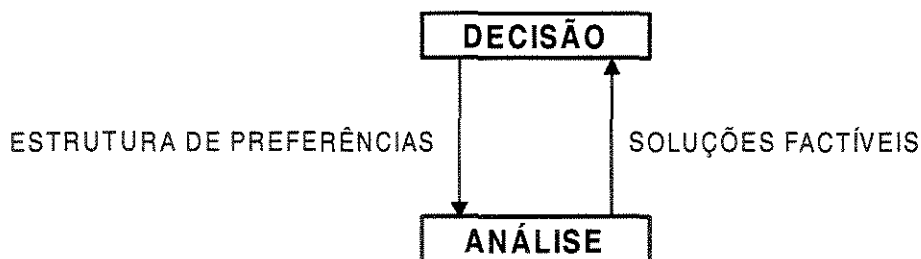


Figura 3.2 - Estrutura em dois níveis

3.5.1 Otimização Multiobjetivo da Operação de Sistemas de Recursos Hídricos

A abordagem tradicional de seleção de alternativas para planejamento da operação de sistemas urbanos de abastecimento de água, baseada fundamentalmente na análise custo-benefício, tem cedido lugar a uma análise mais abrangente considerando múltiplos objetivos.

GOULTER (1986) assinala que a grande maioria dos modelos de otimização para redes de abastecimento público de água tem preocupação somente com o custo físico da rede. No entanto, há outros fatores que não têm implicações diretamente monetárias e que são difíceis de serem considerados, como, por exemplo: confiabilidade e segurança, os quais são fatores difíceis de serem quantificados em termos puramente monetários, mas sem dúvida, fatores importantes ao projeto da rede. No Brasil, verifica-se um crescente interesse pela utilização das técnicas de análise multiobjetivo no tratamento de problemas de recursos hídricos, ainda que a maior parte limitada a estudos acadêmicos. Segundo BARBOSA (1997c), esta é uma tendência internacional e irreversível, representando um marco de evolução das sociedades democráticas.

ORMSBEE e LANSEY (1994) assinalam que uma vez instalado um sistema de controle ótimo, este pode ser usado para satisfazer vários objetivos operacionais do sistema com custo mínimo. Dentre os objetivos que os sistemas de abastecimento de água devem atender destacam-se o desempenho hidráulico e a eficiência econômica. Para as medidas de desempenho hidráulico, incluem-se os níveis de pressão na rede,

o atendimento às demandas, a qualidade da água, a garantia de proteção contra incêndios, etc. Já a eficiência econômica é determinada por vários fatores como custos de manutenção, custos de bombeamento, etc. O critério de custo mínimo de construção, embora importante, deve ser considerado em conjunto com a confiabilidade do sistema e o custo de manutenção da rede, conforme recomendado por GOULTER (1986), uma vez que a pretensa economia que se possa fazer na etapa construtiva se traduzirá em maiores custos de manutenção.

Dentre os objetivos que estão envolvidos em um modelo de otimização para operação de sistemas de abastecimento de água, pode-se citar JARRIGE (1993):

- a) Mínimo Custo: É o principal objetivo nos sistemas de abastecimento de água. Experiências comprovam que é possível atingir reduções de 5 a 20% no consumo de energia elétrica. No passado, a maioria dos modelos eram desenvolvidos para atender esse único objetivo;
- b) Controle de Vazamentos: Para que o sistema apresente uma boa eficiência, é necessário minimizar as pressões de serviço para controlar as perdas na rede, objetivando diminuir o volume de água que é tratado e aduzido, mas não faturado;
- c) Segurança: Melhorar a segurança da operação dos sistemas usando a automação, pois uma das mais freqüentes causas de falhas em sistemas complexos é o erro humano ou o mal-entendido;
- d) Qualidade do Serviço: Deve-se procurar sempre o melhor padrão de qualidade do serviço, como exemplo a manutenção das condições operacionais do sistema (pressão, vazão, qualidade da água, etc);
- e) Homogeneização da Distribuição do Déficit: Evitar a concentração de falhas do sistema em determinadas regiões, distribuindo assim de forma equilibrada possíveis deficiências no atendimento à demanda;

3.6 Classificação das Técnicas Multiobjetivo

Segundo COHON e MARKS (1975), as técnicas multiobjetivo são geralmente classificadas em termos da forma de participação do decisor no processo de escolha da solução preferida e da natureza do problema. Os métodos podem ser classificados em três grupos:

- Técnicas para geração de soluções não-dominadas;
- Técnicas com articulação prévia das preferências;
- Técnicas com articulação progressiva das preferências;

Para o entendimento de como as estruturas de preferência levam à solução do problema, apresenta-se a seguir uma breve descrição destas técnicas.

3.6.1 Técnicas para Geração de Soluções Não-Dominadas

Nessas técnicas, os analistas identificam e geram um subgrupo de soluções não-dominadas dentro da região de factibilidade inicial. Os resultados são apresentados ao decisor em forma de gráficos ou tabelas e o decisor seleciona dentre elas, a “*melhor solução de compromisso*”. Nesse caso, o analista faz seus estudos sobre a solução do problema sem nenhum conhecimento a priori das preferências do decisor, fornecendo-lhe em seguida todos os resultados obtidos. Essas técnicas trabalham estritamente com a realidade física do problema e não consideram as preferências do decisor, pelo menos na fase de geração de soluções. A identificação do conjunto de soluções não-dominadas ajuda o decisor a adquirir conhecimento sobre a realidade física/operacional do problema.

Há vários métodos para a geração do conjunto das soluções não-dominadas e alguns desses métodos são amplamente conhecidos:

- Método dos pesos;
- Método das restrições;
- Método multi-objetivo de Phillip;
- Método multi-objetivo de Zeleny.

O grupo de soluções não-dominadas pode ser obtido através do método dos pesos ou pelo método das restrições, transformando um problema multiobjetivo em um mono-objetivo, variando seus parâmetros. Esses métodos também podem ser utilizados para a obtenção de soluções não-dominadas em casos de funções-objetivo ou restrições não lineares. GOULTER (1986) estuda um sistema de abastecimento de água onde se aplica um procedimento baseado no método das restrições, introduzindo algumas modificações de caráter específico para cada problema, utilizando-se de uma rotina de programação linear.

Os dois outros métodos citados geram soluções não-dominadas para problemas com relações lineares, entretanto, eles não requerem a transformação do problema em um formato de uniobjetivo. Esses métodos operam diretamente com o vetor de objetivos para obter as soluções não-dominadas.

3.6.2 Técnicas com Articulação Prévia de Preferências

Nesse grupo de técnicas, o decisor fornece informações sobre suas preferências a um analista, o qual é responsável pela estruturação do problema multiobjetivo, antes que o problema seja efetivamente resolvido. As técnicas desta classe são divididas em duas categorias, métodos discretos e métodos contínuos.

a) Métodos Contínuos: Uma vez identificado o subgrupo de soluções não-dominadas para um problema multiobjetivo, por meio de alguns dos métodos citados no primeiro grupo, o decisor é capaz de selecionar uma das soluções não-dominadas como sua escolha final. Entretanto, são comuns situações onde o decisor é relutante ou incapaz de estabelecer sua preferência para um contexto com várias funções objetivo. Para os vários métodos disponíveis, o decisor é solicitado a apresentar suas preferências ou sua estrutura de preferência e assim contribuir para a construção da formulação multi-objetivo no modelo matemático. Para auxiliar o decisor, na articulação de suas preferências, uma série de questões podem ser colocadas para ele, solicitando a consideração de “*trade-offs*” específicos para vários objetivos. Nesse processo, é feito uso de elementos teóricos básicos de probabilidade. Pode-se citar aqui alguns exemplos destes métodos:

- Método da Programação por Metas;
- Método da Função Utilidade Explícita;
- Método da Ponderação de Critérios a Priori.

b) Métodos Discretos: Há muitas situações de decisão nas quais o decisor faz sua escolha dentre um número finito de alternativas, as quais são avaliadas por meio de um grupo comum de objetivos ou critérios. O processo de solução deste tipo de problema pode ser assim descrito:

1º passo: As alternativas devem ser identificadas ou desenvolvidas;

2º passo: Deve-se especificar um grupo comum de critérios para a avaliação das alternativas;

3º passo: Atribuição dos pesos aos critérios;

4º passo: Os níveis de satisfação dos critérios para cada alternativa devem ser determinados;

5º passo: Realização da escolha através da análise da classificação (hierárquica) das alternativas segundo resultados da aplicação do modelo.

Alguns métodos deste grupo podem ser destacados:

- Método da Matriz de Prioridades;
- Método Promethee;
- Método ELECTRE I e II;

3.6.3 Técnicas com Articulação Progressiva de Preferências

As técnicas com articulação progressiva de preferências, geralmente referidas como técnicas interativas, tem tido, nos últimos anos, uma grande aceitação por parte dos pesquisadores e usuários (MACHADO, 1991). A maioria dessas técnicas requer que o decisor forneça preferências ("*trade-offs*") locais na vizinhança de uma alternativa viável. Desse modo, a característica dos métodos desse grupo é um algoritmo geral de aproximação. Em primeiro lugar, uma solução não-dominada é identificada; em segundo, o decisor é solicitado para explicitar a sua preferência e, assim, a informação relativa a essa solução é modificada. Estes dois passos são repetidos até que o decisor defina um nível de aceitabilidade satisfatório. Tipicamente, esses métodos requerem grande envolvimento do decisor no processo de solução. Isso tem a vantagem de permitir ao decisor ganhar um grande entendimento e sensibilidade do problema. Por outro lado, ele requer interação e tem, como desvantagem, o tempo dispendido nesse processo. Alguns métodos desse grupo podem ser destacados:

- Método dos passos;
- Programação de Compromisso;

3.7 Apresentação do Método dos Pesos

Seja o problema original de otimização apresentado a seguir em que se procura minimizar um grupo de funções-objetivo $g(x)$, sujeitas a um conjunto de restrições.

$$\text{Min } F[f(x)]$$

Sujeito a:

$$Ax \geq b$$

onde:

$$f(x) = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_k(x)]$$

$$A = \begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & \cdots & a_{1,n} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & \cdots & a_{2,n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{m,1} & a_{m,2} & \cdots & a_{m,n} \end{bmatrix}$$

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}$$

$$b = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_m \end{bmatrix}$$

O Método dos Pesos toma cada função objetivo e a multiplica por uma fração da unidade. Tal fração é traduzida por um coeficiente de peso para cada função, representado por w_i . As funções ponderadas são somadas para obter uma única função; a qual pode ser facilmente otimizada usando algum método de solução mono-objetivo. Matematicamente, a nova função $F[f(x)]$ é escrita como:

$$F(x) = \sum_{i=1}^k w_i \cdot f_i(x) \dots\dots\dots(3.2)$$

$$\sum_{i=1}^k w_i = 1 \dots\dots\dots(3.3)$$

$$0 \leq w_i \leq 1$$

onde:

$F(x)$: Função multiobjetivo escalar;

$f_i(x)$: Função objetivo i;

w_i : Coeficiente de peso i associado a função objetivo i;

k : Número de funções objetivo.

Nesse método, os coeficientes de peso são assumidos a priori. Esses coeficientes são, então, variados gerando um conjunto de soluções ótimas factíveis, conhecido como grupo de soluções ótimas de Pareto. O decisor seleciona os valores das variáveis desse conjunto de soluções.

3.7.1 Exemplo de Aplicação do Método dos Pesos:

Minimizar duas funções: $f_1(x)$ e $f_2(x)$:

Min { $f_1(x)$, $f_2(x)$ }

Com

$$f_1(x) = 3x^2 \dots\dots\dots(3.4)$$

$$f_2(x) = (5 - x)^2 \dots\dots\dots(3.5)$$

Em primeiro lugar uma nova função é construída:

$$\min(f(x)) = \min(w_1 f_1 + w_2 f_2 = 3w_1 x^2 + w_2 (5 - x)^2) \dots\dots\dots(3.6)$$

Sujeito a:

$$w_1 + w_2 = 1$$

$$w_1, w_2 > 0$$

A função pode assim ser resolvida:

$$\frac{\partial f}{\partial x} = 6w_1x - 10w_2 + 2w_2x \dots\dots\dots(3.7)$$

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} = 6w_1 + 2w_2 > 0 \dots\dots\dots(3.8)$$

$$x^* = \frac{5w_2}{3w_1 + w_2} \dots\dots\dots(3.9)$$

Os valores de x^* podem ser tabelados como função da relação entre os pesos. Estes valores são listados a seguir para os coeficientes de peso de 0,2 a 0,8 com incrementos de 0,2.

Tabela 3.1 – Variação nos pesos W_i

w_1	0.2	0.4	0.6	0.8
w_2	0.8	0.6	0.4	0.2
x	2.86	1.67	0.91	0.38

As duas funções são plotadas num gráfico (Figura 3.3), juntamente com os pontos ótimos para os coeficientes de peso da tabela anterior.

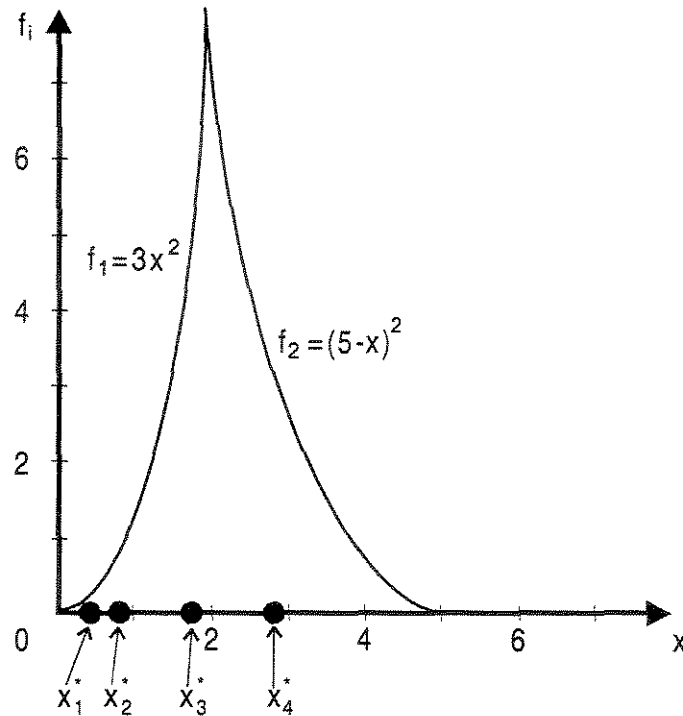


Figura 3.3 – Plotagem das funções objetivo

Fonte: AZARM(1996), Multiobjective Optimization: Supplementary Course Notes.

3.7.2 Interpretação Geométrica do Método dos Pesos

Considerando o espaço convexo das funções objetivo para o problema da otimização de dois objetivos, o problema é minimizar $f_1(x)$ e $f_2(x)$.

Após a introdução dos pesos nos objetivos, o problema torna-se:

$$\min(f) = \min(w_1 f_1 + w_2 f_2) \dots\dots\dots(3.10)$$

Para um dado par de coeficientes de pesos (w_1, w_2) , pode-se obter o valor do ângulo α , conforme a equação 3.11.

$$\alpha = \arctg(-w_1 / w_2) \dots\dots\dots(3.11)$$

A nova função f , composta por f_1 e f_2 , tem coeficiente angular igual a $\tan(\alpha)$. Na Figura 3.4, observa-se o decaimento da função f até a ocorrência do ponto de mínimo. O ponto ótimo associado com estas duas funções é encontrado movendo-se a linha L sobre a região factível até o ponto de tangência na fronteira da região factível. Este ponto tangente é o ponto ótimo, x^* , para os pesos w_1 e w_2 .

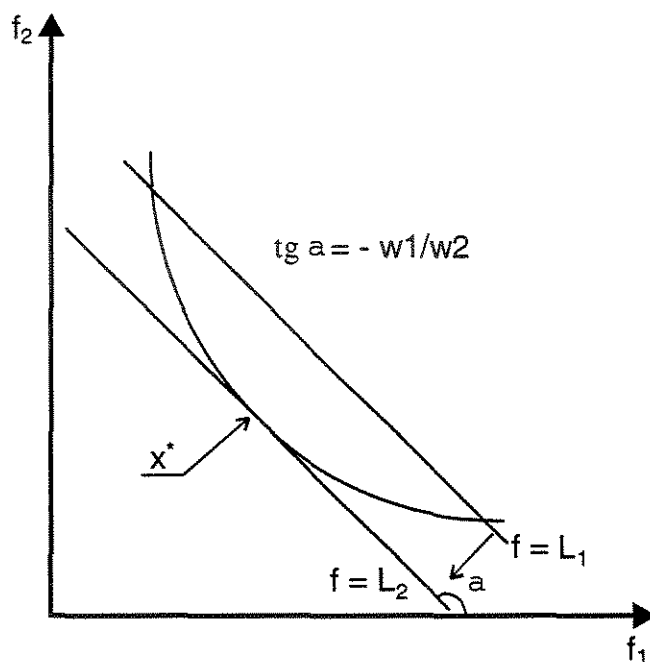


Figura – 3.4 Interpretação geométrica do Método dos Pesos

Fonte: AZARM(1996), Multiobjective Optimization: Supplementary Course Notes.

3.8 Métodos para Projeto e Operação de Redes Hidráulicas

Para o dimensionamento e a operação de redes hidráulicas de abastecimento de água podemos utilizar vários processos de cálculo, cada qual com suas dificuldades e peculiaridades. Apresentam-se, na seqüência, três métodos iterativos com suas vantagens e procedimentos de cálculo. O Método Linear será melhor detalhado pois faz parte do trabalho apresentado.

3.8.1 Método de Hardy-Cross

O método de Hardy-Cross é, sem dúvida, a principal contribuição de interesse histórico para o cálculo de redes hidráulicas malhadas (LUVIZOTTO JUNIOR, 1995). CROSS propôs um método iterativo com procedimento manual e que mais tarde foi adaptado para procedimentos computacionais.

O método é relativamente simples e baseia-se na equação das malhas. Inicia-se o processo com uma estimativa de vazões nos trechos da rede, satisfazendo o equilíbrio nos nós (equação da continuidade). Com os valores de vazões nos trechos, verifica-se a conservação da energia nas malhas. Se a condição de equação de conservação de energia não é atingida, inicia-se um processo iterativo de correção nas vazões e verificações de conservação de energia até as duas condições serem satisfeitas dentro de um limite aceitável.

O mesmo autor propôs uma metodologia alternativa em que se estimam cargas iniciais em cada nó da rede e o processo iterativo busca, então, a equação da continuidade nos nós.

Apesar do método ser amplamente difundido entre os engenheiros projetistas de redes hidráulicas, verifica-se no Método de Hardy-Cross problemas de convergência, principalmente quando aplicado em redes hidráulicas de grande porte. A solução pode ser muito lenta e, em alguns casos, pode ocorrer a não-convergência. VENTURINI (1997a) relata que o tempo computacional no Método de Hardy-Cross é maior que o gasto em outros métodos como o Método da Teoria Linear o Método de Newton Raphson.

3.8.2 Método de Newton Raphson

Com o surgimento dos computadores digitais, a solução numérica de problemas de engenharia passaram a ser interessantes e novos modelos para o tratamento de

redes hidráulicas surgiram. O Método de Newton Raphson pode resolver problemas de sistemas de equações não-lineares.

Conforme VENTURINI (1997a), o Método de Newton Raphson apresenta uma convergência mais rápida que o método de Hardy-Cross, porém a eficiência do método está associada a uma boa estimativa inicial de vazões nos trechos ou das cargas nos nós. WOOD e CHARLES (1972) entendem que o Método de Newton Raphson pode convergir mais rapidamente que o método da Teoria Linear para pequenas redes hidráulicas, porém converge mais lentamente em redes hidráulicas de grande porte.

3.8.3 Método da Teoria Linear

WOOD e CHARLES (1972) propuseram um método alternativo denominado Método da Teoria Linear para a análise de redes hidráulicas com circuitos fechados, baseado na linearização das equações envolvidas no sistema e fazendo uma aproximação inicial para o cálculo da perda de carga no circuito. Basicamente, o cálculo da perda de carga nos trechos de uma rede hidráulica é feito através de uma equação similar à equação (3.12).

$$\Delta h_i = K.Q_i^n \dots\dots\dots(3.12)$$

onde:

- Δh_i : Perda de carga na iteração i de um dado trecho da malha (mca);
- K : Coeficiente para cálculo da perda de carga referente a iteração i;
- Q_i : Vazão no trecho para a iteração i (m³/s);
- n : Expoente da Vazão na expressão para cálculo da perda de carga.

O Método da Teoria Linear propõe a linearização das equações das malhas desacoplando o termo referente à vazão, que tem expoente n, em dois termos, um com expoente unitário e outro com expoente (n-1), conforme a equação (3.13).

$$\Delta h_i = K \cdot Q_{i-1}^{n-1} \cdot Q_i \dots\dots\dots(3.13)$$

O processo iterativo pode ser montado com a adoção da constante K^* , que é determinada na equação 3.14.

$$K^* = K \cdot Q_{i-1}^{n-1} \dots\dots\dots(3.14)$$

onde:

K^* : Coeficiente para cálculo da perda de carga referente à iteração i , com o valor da vazão da iteração $(i-1)$;

Substituindo K^* na equação 3.13 chegamos a equação 3.15.

$$\Delta h_i = K^* \cdot Q_i \dots\dots\dots(3.15)$$

A solução do sistema de equações fornece valores de vazões aproximados, pois utiliza-se um processo aproximado para o cálculo da perda de carga nos trechos. Novos valores de K^* são calculados com os novos valores de vazão e assim o processo vai se repetindo iterativamente, até que seja respeitada uma tolerância na diferença das vazões entre uma iteração e outra, conforme a expressão (3.16).

$$|\Delta Q| = |Q_i - Q_{i-1}| \leq Tolerância \dots\dots\dots(3.16)$$

onde:

ΔQ : Diferença na vazão entre uma iteração i e a iteração $(i-1)$ (m^3/s);

Para o início do procedimento de cálculo, necessita-se determinar um valor inicial de K^* para calcular a primeira perda de carga, então, necessita-se de uma estimativa inicial para as vazões nos trechos. WOOD e CHARLES (1972) aconselham que o primeiro valor de K^* pode ser independente da vazão, ou seja, pode-se fazer o valor de K^* igual a K . Dessa maneira, o início do processo iterativo não necessita de estimativa inicial de vazões nos trechos da malha. Vale lembrar que essa estimativa de

K^* pode aumentar o número de iterações para a convergência do processo iterativo, porém a diferença no tempo de processamento nos computadores atuais é quase imperceptível.

4. ESTUDO E MODELAGEM DOS PRINCIPAIS ACESSÓRIOS DAS REDES HIDRÁULICAS

Para a aplicação de uma metodologia de otimização em redes hidráulicas, é preciso representar o funcionamento dos acessórios, bem como a integração deles no sistema de abastecimento de água. Dentre os elementos presentes nas redes hidráulicas pode-se citar os mais relevantes, os quais são: os reservatórios, as tubulações (redes), as válvulas de controle, os “boosters”, etc. A seguir, apresenta-se uma breve descrição desses elementos e suas respectivas modelagens matemáticas.

4.1 Descrição dos Sistemas de Abastecimento de Água e seus Componentes

Para um melhor entendimento da análise apresentada neste trabalho, optou-se por descrever, brevemente um sistema de abastecimento de água e seus acessórios, de forma a padronizar a terminologia e destacar os aspectos que intervêm no planejamento da operação. Os sistemas de abastecimento de água podem ser divididos, basicamente, em três partes: adução, reservação e distribuição. No presente estudo, pretende-se tratar, principalmente, a distribuição e sua interface com a reservação.

4.1.1 Redes Hidráulicas

As redes hidráulicas de abastecimento de água são conjuntos de tubulações interligadas com o intuito de conduzir a água desde os pontos de reservação até os pontos de consumo. As redes hidráulicas podem ser classificadas em algumas categorias, que são: redes hidráulicas malhadas, redes hidráulicas ramificadas e as

redes hidráulicas mistas. As redes hidráulicas malhadas são constituídas de maneira que um ponto de consumo pode ser alimentado de direções diferentes, ou seja, esse tipo de rede apresenta uma maior flexibilidade de manobra e manutenção. Dependendo das variações na demanda ao longo do dia, o sentido do fluxo nos ramos pode ser invertido. Nesse tipo de rede, o fluxo é praticamente contínuo, não apresentando terminações fechadas, reduzindo efeitos de sedimentação dentro dos tubos. Sobre o aspecto qualitativo, verifica-se uma redução na concentração de cloro residual, apresentando, assim, uma melhor qualidade de água.

As redes hidráulicas ramificadas, também conhecidas como rede em raiz, ou ainda, espinhas de peixe, apresentam pontos terminais fechados. O sentido do fluxo dentro das tubulações é sempre definido e, dessa maneira, o seu dimensionamento é mais simples. Uma grande desvantagem da rede ramificada em relação à rede malhada é sua dificuldade operacional, uma vez que uma manobra em uma válvula compromete todo restante da rede a jusante da válvula.

Para facilitar e proporcionar uma maior eficiência operacional das redes hidráulicas procura-se, atualmente, fazer uma setorização das redes. Desse modo, consegue-se manter um controle mais rigoroso dos sistemas, decompondo-os em subsistemas. Com a setorização da rede, pode-se: detectar com maior facilidade e rapidez pontos com vazamentos na rede, solucionar problemas de pressões elevadas, manobrar somente áreas de interesse, efetuar macro-medições, etc.

4.1.2 Reservatórios

A reserva de água em sistemas de distribuição de água é imposta por condições técnicas, econômicas e de segurança. Segundo AZEVEDO NETO (1975), os reservatórios têm finalidades múltiplas como: compensar as flutuações no consumo, regularizando a vazão média proveniente das Estações de Tratamento de Água (ETAs); assegurar uma reserva de água para situações de emergência como combate a incêndios; fornecer água nos casos de interrupção de adução; regularizar pressões de

serviço a valores mínimos adequados; etc. A capacidade dos reservatórios é obtida em função de sua finalidade principal.

Quanto à localização, os reservatórios devem estar situados de maneira que a água a ser distribuída possa atingir direta e rapidamente os pontos de consumo através das tubulações. A forma geométrica dos reservatórios depende de alguns fatores, tais como: razões econômicas, razões estruturais, opções arquitetônicas do projetista, situações topográficas, etc. Os reservatórios podem ser construídos elevados, enterrados ou apoiados sobre o terreno.

4.1.3 Estações de Bombeamento (“Boosters”)

As estações elevatórias, casas de bombas e “boosters” são designações utilizadas para indicar instalações de mesma natureza destinadas a abrigar bombas ou conjunto de bombas e dispositivos complementares (AZEVEDO NETO,1975). A utilização de bombas hidráulicas é encontrada tanto nas estações de bombeamento nos sistemas de adução que abastecem os reservatórios, como também dentro das redes hidráulicas, operando como estações elevatórias ou “boosters”. Essas estações elevatórias têm como objetivo garantir pressões mínimas adequadas em pontos críticos da rede, sem a necessidade de elevação de reservatórios ou substituição de tubulações. As estações de bombeamento são geralmente compostas por associações de bombas em série ou paralelo, dependendo da necessidade do sistema. Em muitos casos, torna-se conveniente a utilização de bombas com variadores de frequência, uma vez que as vazões sofrem variações atreladas à demanda ao longo do dia. Nas instalações com “booster”, não existe o poço de sucção, pois a água encaminhada para a entrada da bomba provém de tubulação sob pressão.

4.1.4 Válvulas

As válvulas são elementos necessários para efetuar o controle das condições de pressão e vazão em um conduto forçado com escoamento em regime permanente (LUCCA,1998). As válvulas podem interromper totalmente o fluxo ou realizar a

passagem entre dois regimes permanentes. Em seu universo, encontramos um grande número de tipos, fabricantes e modelos diferentes, cada qual específico para uma determinada finalidade. O acionamento das válvulas pode ser manual, comandadas por motor ou automáticas; sendo que as válvulas comandadas por motor utilizam servomecanismos e podem ser comandadas a distância. Dentre os principais tipos, podemos destacar as válvulas limitadoras de pressão que garantem uma pressão especificada a jusante da mesma (indicada para ocasiões de pressões excessivamente elevadas) e as válvulas limitadoras de vazão que garantem um controle da vazão num determinado ramo da rede hidráulica, permitindo, assim, a manobrabilidade do sistema. As vazões a serem liberadas dos reservatórios, para a manutenção do ciclo diário de enchimento e esvaziamento é dependente da operação de válvulas de controle nas saídas e entradas dos reservatórios.

4.2 Modelagem Matemática dos Componentes dos Sistemas de Abastecimento de Água

A modelagem aqui desenvolvida para os componentes das redes hidráulicas é feita de maneira que haja compatibilidade com a metodologia de programação linear a ser aplicada na sequência do modelo.

4.2.1 Tubulações

Os tubos são os elementos que unem os nós das redes hidráulicas. Através desses, as vazões são transportadas, sob pressão, desde os pontos de reservação até os pontos de consumo. Os tubos são dimensionados ou operados de maneira que a água atinja as residências com pressões adequadas para alcançar os reservatórios domiciliares. Para as situações de cálculo, sabe-se que a energia do fluído decai na direção do escoamento sob efeito da perda de carga. A perda de carga pode ser calculada por meio de formulações empíricas como a equação de Hazen-Williams (equação 4.1) ou pela utilização da fórmula universal, expressão de “Darcy-Weisbach” (equação 4.2), considerada mais precisa. Para o cálculo da perda de carga por meio da

fórmula universal, necessita-se calcular o fator de atrito (f) e também o número de Reynolds (Re_y). O número de Reynolds pode ser obtido pela equação 4.3 e o fator de atrito pode ser obtido pela fórmula semi-emprírica de “Colebrook-White” (equação 4.4), que pode ser aplicada a todo o regime turbulento ($Re_y > 4000$), regime praticamente predominante nos escoamentos nas redes hidráulicas.

Para a determinação do fator de atrito pela fórmula de “Colebrook-White”, necessita-se implementar um procedimento iterativo, uma vez que o fator de atrito aparece nos dois membros da equação e não pode ser isolado para que seja resolvido de forma algébrica. ASSY (1977) aplica um processo numérico iterativo para resolver a fórmula de “Colebrook-White” (Equação 4.7), fazendo a relação $1/\sqrt{f}$ igual a x , resolvendo a equação pelo método numérico de Newton-Raphson. Outro modo de obter o fator de atrito, seria pelas fórmulas explícitas encontradas em HAALAND (1983) e KOIDE (1998). Na modelagem de solução do problema, o cálculo iterativo do fator de atrito, pela fórmula de “Colebrook-White”, é extremamente simples para ser implementado.

$$\Delta h = \frac{10.64 \cdot Q^{1.85} \cdot L}{D^{4.87} \cdot C^{1.85}} \dots\dots\dots(4.1)$$

$$\Delta h = \frac{8 \cdot f \cdot Q^2 \cdot L}{\pi^2 \cdot D^5 \cdot g} \dots\dots\dots(4.2)$$

$$Re_y = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D \cdot \vartheta} \dots\dots\dots(4.3)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \text{Log} \left(\frac{e}{3.7D} + \frac{2.51}{Re_y \cdot \sqrt{f}} \right) \dots\dots\dots(4.4)$$

onde:

- Δh : Perda de Carga no trecho (mca);
 Q : Vazão no trecho (m³/s);
 f : Fator de atrito;

- L : Comprimento da tubulação (m);
 D : Diâmetro da tubulação (m);
 g : Aceleração da gravidade (m^2/s).
 C : Coeficiente de Hazen-Williams;
 Re : Número de Reynolds;
 e : Rugosidade da parede da tubulação (m);
 π : Constante matemática;
 ν : Viscosidade cinemática do água (m^2/s).

4.2.2 Modelagem de “Boosters”

As bombas são utilizadas nas redes hidráulicas como “boosters”, ou seja, são elementos que garantem uma altura manométrica adequada, para uma dada vazão requerida, possibilitando deste modo a operação do sistema.

Para um melhor entendimento, apresenta-se na Figura 4.1 a linha piezométrica para um dado ramo de uma rede hidráulica que contenha uma bomba. Em seguida, apresenta-se, na equação 4.5, o balanço de energia para o referido trecho da rede.

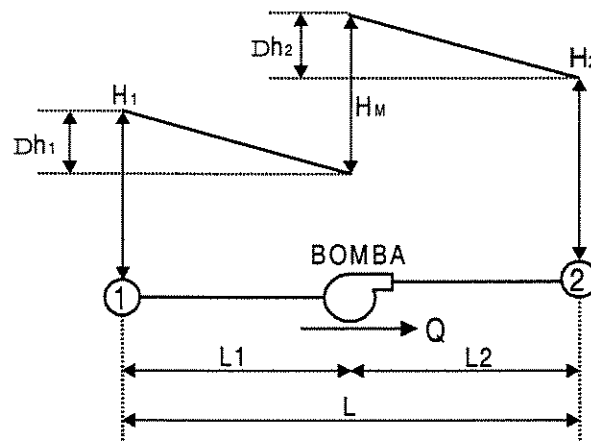


Figura 4.1 - Esquema de um trecho com uma bomba

$$H_2 = H_1 + H_M - \Delta h_1 - \Delta h_2 \dots\dots\dots(4.5)$$

onde:

H_M :	Altura manométrica do ponto de trabalho da Bomba (mca);
H_1 :	Altura piezométrica no nó 1 (mca);
H_2 :	Altura piezométrica no nó 2 (mca);
L :	Comprimento do trecho (m);
L_1 :	Parte do comprimento do trecho a montante do “booster” (m);
L_2 :	Parte do comprimento do trecho a jusante do “booster” (m);
Δh_1 :	Perda de carga do nó 1 até a bomba (mca);
Δh_2 :	Perda de carga da bomba até o nó 2 (mca);
Q :	Vazão (m^3/s).

É simples entender o funcionamento de uma bomba dentro de uma rede hidráulica, porém torna-se difícil a operação de um sistema onde as demandas apresentam variações ao longo das horas do dia, fazendo com que a bomba tenha que operar sob diversas condições de vazão e altura manométrica. Por exemplo, nos horários de pico de consumo as vazões são altas nos trechos da rede e com vazões mais altas, as perdas de carga também tornam-se mais elevadas. Nos momentos de demanda baixa as vazões são pequenas nos ramos o que denota pequenas perdas de carga e, desse modo, exige-se da bomba baixas alturas manométricas. A curva de uma bomba $H=f(Q)$ apresenta, para valores baixos de vazão, uma correspondente altura manométrica elevada e para valores altos de vazão uma altura manométrica menor que no outro caso. Para facilitar a compreensão do caso, elaborou-se a Figura 4.2.

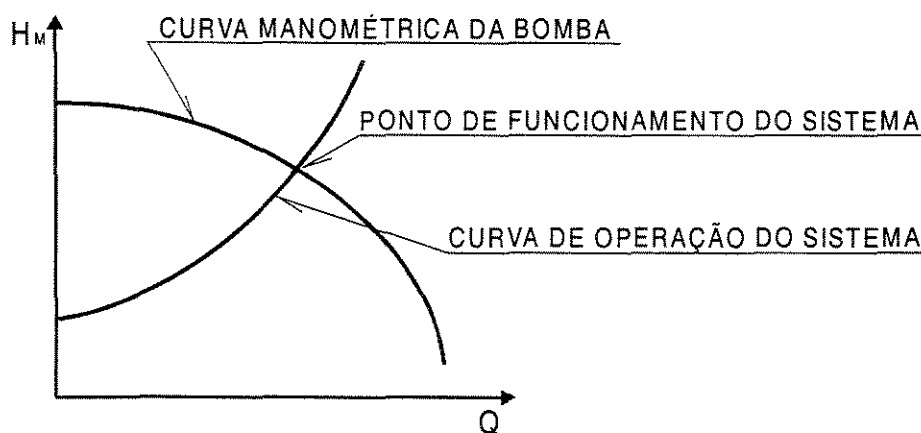


Figura 4.2 - Ponto de funcionamento de uma bomba

Fica claro e evidente, por meio da Figura 4.2, que a bomba oferece condição restrita de operacionabilidade, pois somente um ponto de sua curva atende às necessidades do sistema. Diante dessa situação, temos duas soluções para o ajuste da operação da bomba a outros pontos de funcionamento:

- a) utilização de válvulas com o objetivo de obter um perda de carga localizada que ajuste a altura manométrica oferecida pela bomba à altura manométrica requerida pela sistema. Nesse caso, trabalha-se com uma bomba capaz de atender, em seu ponto de funcionamento, uma carga manométrica ligeiramente superior à requerida. Essa saída não é interessante uma vez que parte da a altura manométrica produzida pela bomba é perdida pela válvula e isto significa desperdício de energia, o que não condiz com uma política de operação otimizada. Na Figura 4.3, apresentam-se as curvas do sistema com a válvula totalmente aberta e parcialmente aberta, fazendo o ajuste da altura manométrica;

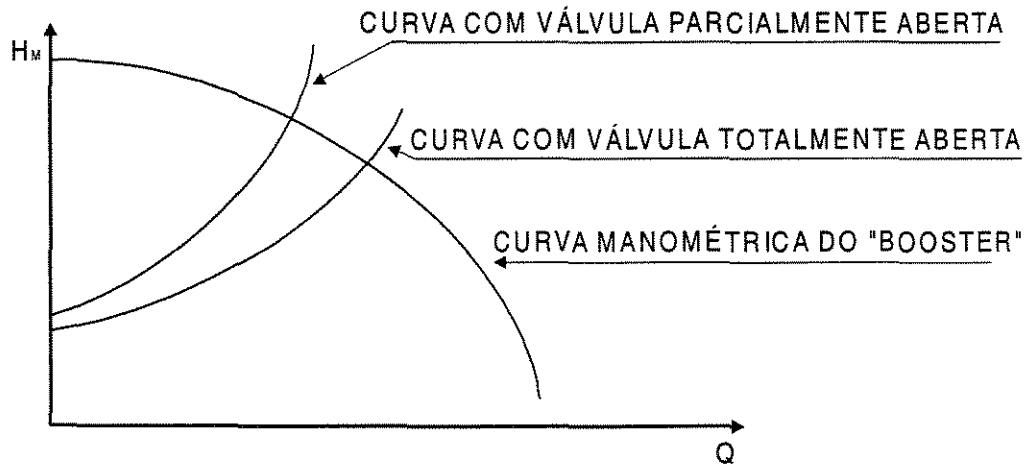


Figura 4.3 – Ajuste de altura manométrica por meio de válvula

- b) utilização de bombas centrífugas com velocidade de rotação variável. Essas bombas, quando alteradas suas rotações normais (dentro de um limite aceitável), apresentam diferentes curvas manométricas, sendo possível ajustar-se a rotação de trabalho da bomba para cada determinado par (Q , H_m). Para uma melhor visualização dessa situação, observar a Figura 4.4.

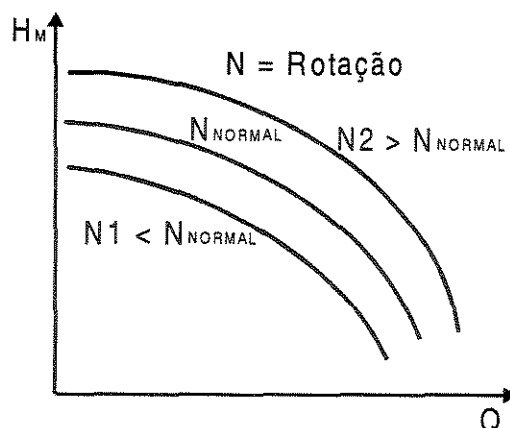


Figura 4.4 - Curvas manométricas de bombas para diferentes velocidades de rotação

De acordo com a Figura 4.4, é possível escolher uma velocidade de rotação da bomba, para um par vazão e altura manométrica, estabelecidos pela operação do sistema. Para um bom funcionamento de uma bomba, com rotação variável, deve-se consultar o manual da mesma para saber qual a faixa de variação na rotação aceitável, defendendo-se da possibilidade da ocorrência de cavitação ou rendimento muito baixo. Esses limites são facilmente implementados como restrições dentro do modelo de otimização.

Para que haja uma maior facilidade no entendimento do equacionamento do problema, justifica-se aqui, a observação e estudo de alguns pontos característicos da curva ($H_m \times Q$) para a bomba. Esses pontos são apresentados na Figura 4.5.

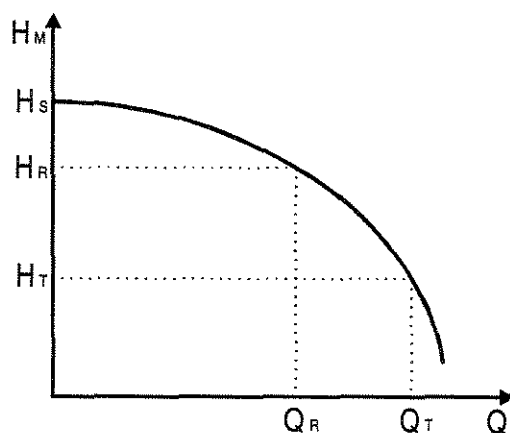


Figura 4.5 - Pontos característicos para equacionamento da curva da bomba

onde:

- H_S : Altura manométrica quando a vazão for zero (shut off) (mca);
 H_R : Altura manométrica quando o rendimento for máximo (mca);
 H_T : Altura manométrica num ponto qualquer (mca);
 Q_R : Vazão correspondente ao ponto de rendimento máximo (m³/s);
 Q_T : Vazão correspondente a um ponto qualquer (m³/s).

Na equação 4.6, apresenta-se um polinômio do 2º grau que descreve a curva (H x Q) para a bomba.

$$H = C_0 + C_1 \cdot Q + C_2 \cdot Q^2 \dots\dots\dots(4.6)$$

onde:

$$C_0 = H_S \dots\dots\dots(4.7)$$

$$C_1 = \frac{(H_S - H_R) \cdot Q_R^2 - (H_S - H_T) \cdot Q_T^2}{Q_R \cdot Q_T^2 - Q_T \cdot Q_R^2} \dots\dots\dots(4.8)$$

$$C_2 = \frac{(H_S - H_R) \cdot Q_T - (H_S - H_T) \cdot Q_R}{Q_R \cdot Q_T^2 - Q_T \cdot Q_R^2} \dots\dots\dots(4.9)$$

O equacionamento da curva da bomba feito anteriormente refere-se a uma dada rotação normal de operação da mesma. Para o trabalho com rotação variável, faz-se necessário incluir no equacionamento uma rotação de trabalho qualquer (n) como função de uma rotação de referência (rotação normal). MACINTYRE (1987) e LENCASTRE (1987) apresentam a congruência das curvas “Descarga - Altura de Elevação”, considerando a rotação da bomba que resulta na equação da superfície (equação 4.10).

$$\phi(Q_x, H_x, n) = 0 \dots\dots\dots(4.10)$$

onde:

- Q_x : Vazão no ponto de funcionamento para a rotação n (m³/s);

H_x : Altura manométrica no ponto de funcionamento para a rotação n (m);

Ainda em MACINTYRE (1987) e LENCASTRE (1987), após algumas transformações, chega-se à equação geral do parabolóide hiperbólico, conforme equação 4.11.

$$H_x = A_1 \cdot n^2 + 2 \cdot B_1 \cdot n \cdot Q_x - C \cdot Q_x^2 \dots\dots\dots(4.11)$$

Na tentativa de obter uma expressão que fornecesse a rotação da bomba para um determinado par (H, Q) , igualam-se os termos membro a membro das equações 4.6 e 4.11, resultando nas equações 4.12, 4.13, 4.14 e 4.15.

$$H = H_x \dots\dots\dots(4.12)$$

$$A_1 \cdot n_n^2 = C_0 \dots\dots\dots(4.13)$$

$$2 \cdot B_1 \cdot n_n = C_1 \dots\dots\dots(4.14)$$

$$-C = C_2 \dots\dots\dots(4.15)$$

Resolvendo as equações, obtêm-se os seguintes valores para as variáveis:

$$A_1 = C_0 / n_n^2$$

$$B_1 = C_1 / (2 \times n_n)$$

$$C = -C_2$$

Substituindo-se os valores das variáveis A_1 , B_1 e C na equação 4.11, consegue-se montar a equação 4.16.

$$H_x = (C_0 / n_n^2) \cdot n^2 + (C_1 / n_n) \cdot n \cdot Q_x + C_2 \cdot Q_x^2 \dots\dots\dots(4.16)$$

Para valores de altura manométrica (H_x) e vazão Q_x fixos, a equação 4.16 torna-se uma equação do 2º grau em função de n_n (rotação normal de funcionamento do “booster”) e sua raiz positiva representa a rotação requerida para que a bomba atenda

a altura manométrica e a vazão do ponto de funcionamento. A raiz da equação é apresentada a seguir:

$$n = \frac{n_n}{2 \cdot C_0} \left((-C_1 \cdot Q_x) + \sqrt{(-C_1 \cdot Q_x^2) - (4 \cdot C_0 \cdot C_2 \cdot Q_x^2) + (4 \cdot C_0 \cdot H_x)} \right) \dots\dots\dots(4.17)$$

onde:

n_n : Rotação normal de funcionamento do “booster” (rpm).

No Apêndice – D deste trabalho, apresenta-se o equacionamento completo para um “booster” que será utilizado adiante no estudo de caso. No equacionamento, simula-se para alguns pares de valores (Q_x, H_x) a rotação operacional do “booster”.

4.2.3 Modelagem de Válvulas

As válvulas são utilizadas nas redes hidráulicas, principalmente, como elementos de controle do sistema. Neste estudo, elas servirão como elementos de controle de vazão, ou seja, serão elementos que garantirão as vazões especificadas pelo modelo nos trechos onde elas estiverem instaladas. A válvula é uma singularidade na rede e assim provoca uma perda de carga localizada em seu ponto de instalação. O equacionamento desta perda de carga depende de uma curva específica da válvula que relaciona coeficiente de perda de carga localizada e abertura da válvula.

Neste trabalho, equacionam-se dois tipos de válvulas. Um primeiro tipo é baseado no ábaco n. 64 de LEVIN (1968) o qual foi construído para válvulas do tipo gaveta. Num segundo caso, devido à dificuldade de dados técnicos confiáveis e precisos sobre o equacionamento da abertura das válvulas de controle adjacentes aos reservatórios, optou-se pelo desenvolvimento de uma equação genérica onde empregasse a equação de um quadrante de uma circunferência.

4.2.3.1 Modelagem da válvula pelo ábaco de LEVIN

O cálculo da perda de carga localizada em uma válvula tem como maior dificuldade a determinação de K_L (Coeficiente de perda de carga localizada para a válvula), haja visto que o mesmo é variável e dependente da abertura da válvula. Na equação 4.18, apresenta-se a expressão para o cálculo da perda de carga localizada na válvula.

$$\Delta h_v = \frac{8.K_L.Q^2}{\pi^2.D^4.g} \dots\dots\dots(4.18)$$

Onde:

- Δh_v : Perda de carga localizada na válvula (mca);
- D : Diâmetro do tubo (m);
- g : Aceleração da gravidade (m/s^2);
- K_L : Coeficiente de perda de carga na válvula;
- Q : Vazão (m^3/s);

O coeficiente K_L está relacionado com a abertura da válvula, tendendo para o infinito quando a válvula está fechada e assumindo valores bem pequenos quando próximo da abertura total. Para a relação entre a abertura da válvula e o respectivo coeficiente de perda de carga localizada, utilizou-se o ábaco número 64 obtido em LEVIN (1968), conforme a Figura 4.6.

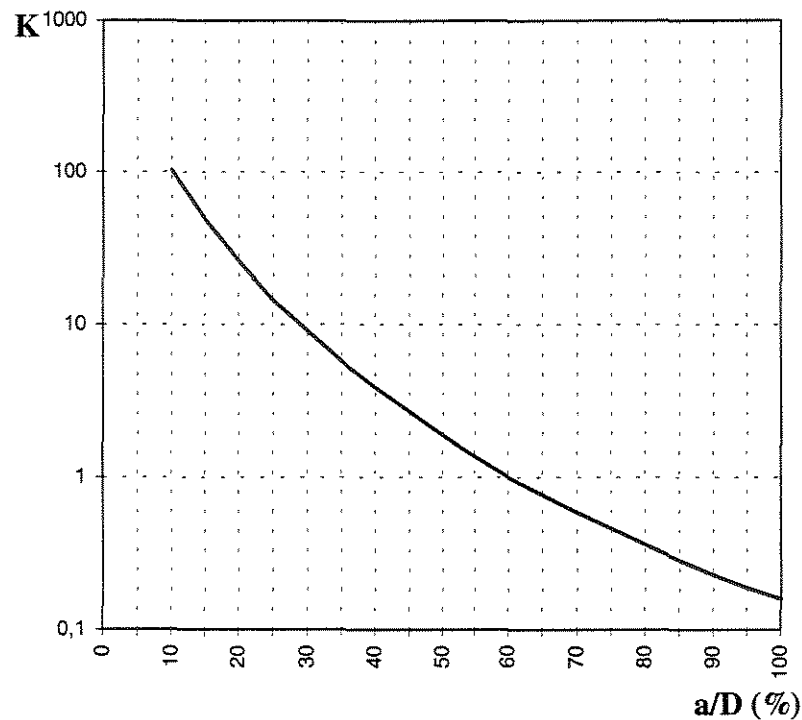


Figura 4.6 - Relação entre porcentagem de abertura da válvula e o coef. K_L

Fonte: adaptada de LEVIN (1968)

Após vários estudos para o equacionamento numérico da curva de abertura da válvula obtida em LEVIN (1968), optou-se por dividir tal curva em quatro partes e obteve-se a expressão da abertura X (equação 4.20), em porcentagem, em função do valor de K_L que é calculado pela equação 4.19.

$$K_L = \frac{\Delta h_v \cdot \pi^2 \cdot D^4 \cdot g}{8 \cdot Q^2} \dots\dots\dots(4.19)$$

O valor da abertura da válvula (X), em porcentagem, pode ser obtido pela equação 4.20, utilizando-se os coeficientes E_1 e E_2 da Tabela 4.1, extraídos da curva da Figura 4.6. Dessa maneira, o cálculo da abertura da válvula é obtido, de forma indireta, em função da perda de carga localizada que a válvula deve provocar.

$$X = \frac{E_1 - \text{Log}(K_L)}{E_2} \dots\dots\dots(4.20)$$

onde:

X : Porcentagem de abertura da válvula (%);

E_1 : Primeira variável auxiliar para o equacionamento da curva de LEVIN;

E_2 : Segunda variável auxiliar para o equacionamento da curva de LEVIN;

Tabela 4.1 - Coeficientes para cálculo da abertura da válvula

K_L	E_1	E_2
$0.16 \leq K_L < 0.56$	1.017680	0.018136
$0.56 \leq K_L < 3.8$	1.688578	0.027720
$3.8 \leq K_L < 25$	2.216096	0.040908
$25 \leq K_L < 100$	2.602060	0.060206

4.2.3.2 Modelagem da válvula por uma curva genérica

A seguir, apresenta-se o equacionamento de uma curva genérica para o cálculo da abertura de uma válvula. A equação 4.21 apresenta a equação de uma circunferência de raio R . Já, na equação 4.22, substitui-se o valor do raio da circunferência pelo número 100 e suas coordenadas do centro como: (100,100), que representam pontos característicos da curva. A Figura 4.7 representa a curva genérica para tal estudo.

$$(X_o - X_c)^2 + (Y_o - Y_c)^2 = R^2 \dots\dots\dots(4.21)$$

$$(X_o - 100)^2 + (Y_o - 100)^2 = 100^2 \dots\dots\dots(4.22)$$

Onde:

X_o : Coordenada X da circunferência;

Y_o : Coordenada Y da circunferência;

X_C : Coordenada X do centro da circunferência;
 Y_C : Coordenada Y do centro da circunferência.

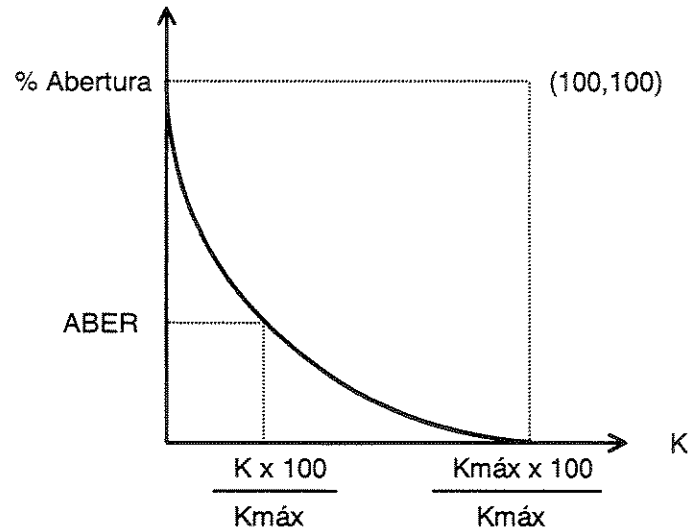


Figura 4.7 – Curva genérica de válvula

Desenvolvendo a equação 4.22 e respeitando o sinal aritmético do quadrante especificado, conforme a Figura 4.7, chega-se à equação 4.23, na qual se isola o valor de Y_o ficando o mesmo em função de X_o .

$$Y_o = 100 - \sqrt{200X_o - X_o^2} \dots\dots\dots(4.23)$$

De posse da equação 4.23, procede-se a uma substituição de variáveis, conforme as equações 4.24 e 4.25, resultando na equação 4.26 que, finalmente, relaciona os valores de K_L , $K_{MÁX}$ e X .

$$X_o = K_L \times \frac{100}{K_{máx}} \dots\dots\dots(4.24)$$

$$Y_o = X \dots\dots\dots(4.25)$$

$$X = 100 \times \left[1 - \left(\frac{K_L}{K_{máx}} \times \left(2 - \frac{K_L}{K_{máx}} \right) \right)^{\frac{1}{2}} \right] \dots\dots\dots(4.26)$$

Na equação 4.26, verifica-se a existência do termo $K_{MÁX}$ que representa um limite operacional para manobra da válvula, podendo-se estabelecer um valor de $K_{MÁX}$ para cada válvula. Observa-se que na equação 4.20 obtida na análise pelo gráfico de LEVIN não se contempla o valor de $K_{MÁX}$.

Onde:

$K_{MÁX}$: Valor do coeficiente de perda de carga máximo operacional.

4.2.4 Modelagem de Reservatórios

A modelagem dos reservatórios é relativamente simples e basicamente consiste em fazer a relação entre a variação dos níveis d'água e as vazões de entrada e saída dos reservatórios. Observa-se que os reservatórios com seção transversal constante são mais fáceis de serem equacionados pois as relações são lineares. Na equação 4.27, apresenta-se o equacionamento dos reservatórios.

$$Q_A - Q_T = (HR_F - HR_I) \times SB \dots\dots\dots(4.27)$$

onde:

- Q_A : Vazão aduzida ao reservatório (m^3/s);
- Q_T : Vazão no trecho ligado ao reservatório (m^3/s);
- HR_I : Cota inicial do nível d'água no reservatório (m);
- HR_F : Cota final do nível d'água no reservatório (m);
- SB : Área da seção transversal da base do reservatório prismático (m^2);

5. DESENVOLVIMENTO DO MODELO COMPUTACIONAL

O problema a ser otimizado pela modelagem apresenta a seguinte caracterização: a) trata-se de um problema de planejamento operacional, b) o horizonte de operação é diário, c) os intervalos de operação são horários, d) os objetivos operacionais foram extraídos da experiência obtida nas entrevistas com gestores de sistemas urbanos de abastecimento de água.

O desenvolvimento do modelo computacional de otimização considera a necessidade de codificação dos elementos da rede física, incluindo a modelagem específica de cada acessório da rede hidráulica, conforme apresentados no capítulo 4.

Também é necessária a implementação de leis básicas da Hidráulica aplicadas ao cálculo de redes, como: balanço de massa nos nós e o equilíbrio de energia nos anéis. No modelo podem ser equacionados aspectos operacionais previamente estabelecidos para o atendimento às legislações e normas técnicas vigentes.

Para viabilizar o tratamento e análise dos resultados, pode-se estabelecer variáveis auxiliares que não influenciam na política ótima resultante fornecida pelo modelo.

O modelo desenvolvido neste trabalho aplica uma metodologia baseada no Método da Teoria Linear apropriada para o cálculo de redes hidráulicas utilizando-se a programação linear para o processo de otimização e fazendo-se uso de procedimentos iterativos para contornar problemas de não linearidade presentes nas equações que regem os sistemas (redes hidráulicas). Para a abordagem multiobjetivo, que faz parte

do escopo da tese, é aplicado o Método dos Pesos, que apresenta uma estrutura simples e adequada para o tratamento do problema de redes hidráulicas de abastecimento urbano de água.

Portanto, observa-se que o método proposto no trabalho apresenta uma estrutura simples, mas nem por isso incompleta, para resolver o problema da operação de redes hidráulicas.

5.1 Equacionamento do modelo matemático

O equacionamento do modelo será descrito na seqüência. Trata-se de um modelo de otimização multiobjetivo, com intervalo de discretização horário e horizonte de operação igual a 24 horas. As restrições incluídas são aquelas típicas da operação de sistemas de abastecimento de água, visando garantir uma representação realística do problema e a viabilidade de implementação dos resultados.

Diante do grande número de variáveis e da necessidade de gerar o conjunto de soluções não dominadas (múltiplas soluções), optou-se pela otimização via programação linear. As equações não-lineares foram linearizadas por meio do desacoplamento das variáveis nos termos não-lineares (equação 3.12), o que exige, em contrapartida, o processo iterativo de busca da solução final.

5.2 Estudo das Funções Objetivo

Dentre as funções objetivo já comentadas no item 3.5.1, foram adotadas no trabalho: (a) minimização da flutuação da vazão bombeada na ETA; (b) minimização da vazão bombeada no “booster”; (c) maximização dos volumes armazenados nos reservatórios; (d) minimização da pressão média nos nós e (e) minimização da perda de carga nas válvulas. A justificativa para a escolha dessas funções advém de percepção sobre o problema adquirida por meio do contato, no início da pesquisa, com

profissionais envolvidos no setor de operações de empresas de abastecimento urbano de água e também por meio da literatura da área.

5.2.1 Minimização da flutuação na vazão da ETA

Da experiência vivida durante as visitas às empresas de abastecimento de água, verificou-se que muitos dos sistemas não conseguem fazer uma captação e tratamento constante de água, sendo obrigados a variar a vazão durante o dia, dificultando o sistema de tratamento e adução devido à variação de demanda. Essa flutuação dificulta o processo de adução (captação e bombeamento) e tratamento de água bruta (dosagem de componentes químicos). Assim, objetiva-se minimizar essa flutuação em torno da vazão média na ETA (Estação de Tratamento de Água). Para a modelagem dessa função, optou-se por dividir a vazão proveniente da ETA em duas parcelas, uma parcela fixa e igual à média diária e outra variável em função da demanda horária. Desse modo, pôde-se descrevê-la como:

$$Q_{ETA_t} = Q_M + \Delta Q_t \dots\dots\dots(5.1)$$

Onde:

- Q_{ETA_t} : Vazão aduzida na ETA no tempo t (m^3/s);
- Q_M : Vazão média aduzida na ETA (m^3/s);
- ΔQ_t : Variação da vazão da ETA no tempo t (m^3/s);
- t : Índice referente ao tempo.

Assim podemos escrever a função objetivo como:

$$Z_1 = \sum_{t=1}^{24} |\Delta Q_t| \dots\dots\dots(5.2)$$

Onde:

- Z_1 : Função Objetivo 1.

Nessa função, o modelo busca a minimização da soma dos valores dos módulos de ΔQ_t , acumulada ao longo do horizonte de operação.

5.2.2 Minimização dos custos com energia elétrica

Para efeito de simplificação da metodologia aplicada, assumiu-se que o valor da tarifa de energia elétrica seja constante e que, portanto, minimizar os gastos com energia elétrica tem como aproximação a minimização da vazão bombeada pelo “booster”, pois menor vazão implica numa menor potência. Assim, pode-se descrever a função objetivo:

$$Z_2 = \sum_{t=1}^{24} Q_{BOOSTER_t} \dots\dots\dots(5.3)$$

Onde:

$Q_{BOOSTER_t}$: Vazão no trecho onde o “booster” está instalado no tempo t (m³/s);

Z_2 : Função Objetivo 2.

5.2.3 Maximização dos níveis dos reservatórios

Como medida de prevenção, almeja-se, com essa função objetivo, privilegiar o armazenamento nos reservatórios, buscando sempre maximizar seus níveis. Essa função objetivo vislumbra permitir o tempo máximo de atendimento à população caso ocorra uma falha no sistema adutor ou de tratamento. Embora a função objetivo seja de maximização, para a facilidade da codificação computacional, ela será tomada como de minimização, porém com coeficiente negativo. Assim, pode-se descrevê-la como:

$$Z_3 = (-\sum_{t=1}^{24} \sum_{r=1}^{NR} NRF_{t,r}) \dots\dots\dots(5.4)$$

Onde:

$NRF_{t,r}$: Nível do reservatório r no tempo t (m);

Z_3 : Função Objetivo 3;

NR : Número de reservatórios no sistema;
 r : Índice referente ao reservatório.

5.2.4 Minimização da Pressão Média nos Nós

Um objetivo muito pertinente e amplamente almejado pelos gestores das empresas de abastecimento urbano de água é a diminuição de perdas físicas de água no sistema, pois, além da escassez de recursos hídricos, ainda há perdas com componentes químicos utilizados no tratamento, perdas de energia elétrica utilizada para bombear a água e perdas indiretas por todo sistema em decorrência das perdas físicas de água.

Da Hidráulica, sabe-se que a vazão em um orifício (neste caso, um furo na tubulação advindo de desgaste ou mesmo de rupturas) é função da carga no ponto. Deste modo, quanto maior a carga disponível no ponto (pressão), maior será a vazão no furo ou orifício. Assim, conclui-se que reduzindo a pressão na rede até atingir os níveis mínimos operacionais, consegue-se diminuir, sensivelmente, as perdas de água. A função objetivo utilizada neste caso pode ser escrita como:

$$Z_4 = \sum_{t=1}^{24} \sum_{n=1}^{NN} P_{t,n} \dots\dots\dots(5.5)$$

Onde:

$P_{t,n}$: Pressão disponível no nó n na hora t (mca);
 n : Índice referente ao nó;
 NN : Número de nós do sistema;
 Z_4 : Função Objetivo 4.

5.2.5 Minimização da Perda de Carga nas Válvulas

As válvulas, além de trabalharem como elementos de controle para a vazão, também podem atuar como elementos redutores de pressão, provocando perdas de

carga localizadas. É evidente que se um sistema que trabalha com bombas ou “boosters” e perde energia excessivamente nas válvulas, estará trabalhando de forma ineficiente, seja devido ao projeto do sistema, seja em sua regra operacional. Diante desse quadro hipotético, vislumbrou-se formular uma função objetivo que vai em busca da minimização da perda de carga nas válvulas e pode ser escrita da seguinte maneira:

$$Z_5 = \sum_{t=1}^{24} \sum_{v=1}^{NV} PCV_{t,v} \dots\dots\dots(5.6)$$

Onde:

- $PCV_{t,v}$: Perda de carga na válvula v no tempo t (mca);
 v : Índice referente à válvula;
 NV : Número de válvulas no sistema;
 Z_5 : Função Objetivo 5.

5.3 Função multiobjetivo

A função multiobjetivo é apresentada a seguir (equação 5.7) e pode-se notar que cada função está multiplicada por um coeficiente de peso w_i , já sendo preparada para a aplicação do método dos pesos. Vale a pena lembrar que o coeficiente de peso para a função número 3 (maximização do volume armazenado nos reservatórios) tem sinal aritmético negativo, uma vez que a função uniobjetivo Z_3 é de maximização mas a função multiobjetivo é de minimização.

$$FMO = Min(Z) = Min(w_1.Z_1 + w_2.Z_2 - w_3.Z_3 + w_4.Z_4 + w_5.Z_5) \dots\dots\dots(5.7)$$

Onde:

- FMO : Função multiobjetivo;
 w_1 : Coeficiente de peso associado a função objetivo 1;
 w_2 : Coeficiente de peso associado a função objetivo 2;
 w_3 : Coeficiente de peso associado a função objetivo 3;
 w_4 : Coeficiente de peso associado a função objetivo 4;
 w_5 : Coeficiente de peso associado a função objetivo 5;

No processamento do modelo, as funções são analisadas duas a duas para que se possa compreender melhor as relações de compromissos entre elas (“trade-offs”). Para combinar as funções duas a duas basta fazer os coeficientes de peso w_i das demais funções iguais a zero.

5.4 Restrições e equações auxiliares

5.4.1 Balanço de massa nos nós:

Os nós estão conectados a trechos da rede, podendo representar pontos de união entre dois ou mais trechos, pontos de instalação de “booster” ou representação pontual dos reservatórios.

A primeira lei básica para o cálculo de redes é o balanço de fluxo nos nós. Sendo assim, a soma das vazões que entram no nó é igual, em módulo, a soma das vazões que deixam o nó. A demanda no nó, variável e dependente do tempo, geralmente é obtida por uma demanda média multiplicada por um coeficiente horário obtido de uma curva neutra. A curva neutra apresenta, para as 24 horas do horizonte de planejamento, coeficientes que são obtidos pela divisão de demanda horária pela demanda média nas 24 horas.

$$\sum Q_{T_{n,t}} = \sum Q_{T_{n,t}}^- + QD_n \times CD_t \dots\dots\dots(5.8)$$

onde:

$Q_{T_{n,t}}$: Vazão que chega ao nó n no tempo t (m^3/s);

$Q_{T_{n,t}}^-$: Vazão que sai do nó n no tempo t (m^3/s);

QD_n : Demanda média no nó n (m^3/s);

CD_t : Coeficiente de demanda (curva neutra) no tempo t ;

5.4.2 Balanço de energia nos trechos da rede:

A equação 5.9 representa um trecho da rede onde existe um “booster” e uma válvula de controle instalados. Nos trechos sem a presença do “booster”, não existe a parcela HMB , da mesma forma se não existe válvula instalada não existe a perda de carga provocada pela mesma (PCV).

$$CP_{jus_{l,t}} = CP_{mont_{l,t}} - PC_{l,t} - PCV_{v,t} + HMB_{b,t} \dots\dots\dots(5.9)$$

Onde:

- $CP_{jus_{l,t}}$: Cota piezométrica de jusante do trecho l no tempo t (mca);
 $CP_{mont_{l,t}}$: Cota piezométrica de montante do trecho l no tempo t (mca);
 $PC_{l,t}$: Perda de carga no trecho l no tempo t (mca);
 $PCV_{v,t}$: Perda de carga na válvula v no tempo t (mca);
 $HMB_{b,t}$: Altura manométrica fornecida pelo “booster” b no tempo t (mca);
 l : Índice referente ao trecho;
 t : Índice referente ao tempo;
 v : Índice referente à válvula;
 b : Índice referente ao “booster”.

5.4.3 Regime de operação dos reservatórios:

Os níveis dos reservatórios variam em função do balanço de vazões que entram e saem dos reservatórios. Assim, se a diferença entre as vazões que entram e as vazões que saem do reservatório, numa determinada hora, for positiva o nível do reservatório se eleva para a referida hora, caso contrário o nível é rebaixado. A equação 5.10 apresenta um reservatório do tipo cilíndrico, portanto com área de base SB_r constante. Caso o reservatório tenha uma forma diferente (ex.: cálice) é preciso obter uma expressão para a área da base em função da altura d’água no reservatório.

$$HR_{r,t+1} = HR_{r,t} + (QT_{r,t} - QD_{r,t}) \times \frac{\Delta t}{SB_r} \dots\dots\dots(5.10)$$

Onde:

- $HR_{r,t+1}$: Nível d'água no reservatório r no tempo $t+1$ (m);
 $HR_{r,t}$: Nível d'água no reservatório r no tempo t (m);
 $QT_{r,t}$: Vazão afluente ao reservatório r no tempo t (m³/s);
 $QD_{r,t}$: Demanda associada ao reservatório r no tempo t (m³/s);
 Δt : Intervalo de tempo (s);
 SB_r : Área da seção da base do reservatório cilíndrico r (m²);

5.4.4 Manutenção dos níveis máximos e mínimos nos reservatórios

Além do balanço de massa nos reservatórios, é necessário limitar os armazenamentos máximos e mínimos nos reservatórios. Essa limitação, neste estudo, é de natureza física e os limites são realmente os máximos e mínimos operacionais. Esses limites poderiam ser indexados no tempo e em determinados intervalos assumirem valores diferentes em função de uma política de operação previamente estabelecida.

$$HR_{\min,r} \leq HR_{r,t} \leq HR_{\max,r} \dots\dots\dots(5.11)$$

Onde:

- $HR_{\min,r}$: Nível d'água mínimo de armazenamento no reservatório r (m);
 $HR_{\max,r}$: Nível d'água máximo de armazenamento no reservatório r (m);

5.4.5 Regime de operação do "booster":

O "booster" contribui para elevar a linha piezométrica a jusante de seu ponto de instalação. Como se trata de um "booster" com velocidade de rotação variável a equação 5.12 considera parâmetros que relacionam a rotação nominal de operação do "booster" e a rotação requerida ao ponto de funcionamento. Nessa equação, o modelo ajusta uma velocidade de rotação do "booster" para valores de vazão e altura manométrica requeridos, conforme a equação 5.12.

$$n_{b,t} = \left(\frac{n_{n,b}}{2 \cdot C_{0,b}} \times (-C_{1,b} \cdot QT_{b,t}) \right) + \sqrt{(-C_{1,b} \cdot QT_{b,t} \cdot QT_{b,t}^{ant}) - (4 \cdot C_{0,b} \cdot C_{2,b} \cdot QT_{b,t} \cdot QT_{b,t}^{ant}) + (4 \cdot C_{0,b} \cdot HMB_{b,t})} \dots\dots\dots(5.12)$$

Onde:

- $n_{b,t}$: Rotação do “booster” b no tempo t (rpm);
 $n_{n,b}$: Rotação nominal do “booster” b (rpm);
 $C_{0,b}$: Coeficiente 0 da curva manométrica do “booster” b ;
 $C_{1,b}$: Coeficiente 1 da curva manométrica do “booster” b ;
 $C_{2,b}$: Coeficiente 2 da curva manométrica do “booster” b ;
 $QT_{b,t}$: Vazão no “booster” b no tempo t (m³/s);
 $QT_{b,t}^{ant}$: Vazão no “booster” b no tempo t na iteração anterior (m³/s);
 $HMB_{b,t}$: Altura manométrica no “booster” b no tempo t (mca);

5.4.6 Limitação das rotações máximas e mínimas da bomba do “booster”

O “booster” deve atender às limitações máximas e mínimas de velocidades de rotação especificadas pelo fabricante.

$$n_{mín,b} \leq n_{b,t} \leq n_{máx,b} \dots\dots\dots(5.13)$$

Onde:

- $n_{mín,b}$: Rotação mínima operacional para o “booster” b no tempo t (rpm);
 $n_{máx,b}$: Rotação máxima operacional para o “booster” b no tempo t (rpm);

5.4.7 Limitação das alturas manométricas máximas e mínimas do “booster”:

O “booster” deve atender às limitações máximas e mínimas de alturas manométricas para que tenha condições de operação.

$$HMB_{mín,b} \leq HMB_{b,t} \leq HMB_{máx,b} \dots\dots\dots(5.14)$$

Onde:

$HMB_{mín,b}$: Altura manométrica mínima operacional para o “booster” b (mca);

$HMB_{máx,b}$: Altura manométrica máxima operacional para o “booster” b (mca);

5.4.8 Limitação das pressões máximas e mínimas nos nós da rede:

As pressões de serviço na rede hidráulica devem atender a níveis mínimos para que seja possível o abastecimento aos usuários e a níveis máximos para limitar a ocorrência de problemas na rede tais como rompimentos e vazamentos.

$$P_{mín} \leq CP_{n,t} - CG_n \leq P_{máx} \dots\dots\dots(5.15)$$

Onde:

$CP_{n,t}$: Cota piezométrica do nó n no tempo t (mca);

CG_n : Cota geométrica do nó n (m);

$P_{mín}$: Pressão mínima (mca);

$P_{máx}$: Pressão máxima (mca);

5.4.9 Limitação de velocidades máximas (em módulo) nos tubos da rede

A limitação das velocidades máxima e mínima, nas tubulações, é feita por meio de vazões máximas e mínimas, considerando-se a relação que é possível obter com as seções dos tubos (equação 5.16). Para os casos onde não ocorrem problemas com velocidade mínima, pode-se trabalhar com um único limitante sendo este a velocidade máxima. Calcula-se a velocidade em módulo e pode-se trabalhar com a inversão do fluxo no tubo, conforme a equação 5.17.

$$V_{mín} \leq \left(\frac{4}{\pi \times D_l^2} \times QT_{l,t} \right) \leq V_{máx} \dots\dots\dots(5.16)$$

$$|QT_{l,t}| \times \left(\frac{4}{\pi \times D_l^2} \right) \leq V_{máx} \dots\dots\dots(5.17)$$

Onde:

- D_l : Diâmetro do trecho l (m);
 $QT_{l,t}$: Vazão do trecho l no tempo t (m³/s);
 $V_{\min}$: Velocidade mínima permissível no trecho (m/s);
 $V_{\max}$: Velocidade máxima permissível no trecho (m/s);

5.4.10 Cálculo da perda de carga em cada trecho da rede

O equacionamento da perda de carga pode ser feito utilizando-se a Fórmula Universal, ou por meio de fórmulas empíricas (como por exemplo a Fórmula de Hazen-Williams) dependendo dos dados disponíveis sobre as paredes das tubulações.

No trabalho com a Fórmula Universal, a constante $FPC_{l,t}$ está associada à perda de carga ocorrida no trecho, sendo o valor do fator de atrito obtido pela fórmula de Colebrook-White. A simplificação adotada para tratar as não-linearidades consiste em desacoplar o termo quadrático das vazões em cada trecho $QT^2_{l,t}$ em duas parcelas: $QT_{l,t}$ e $QT_{l,t}^{ant}$ (equação 3.15). O valor de $QT_{l,t}^{ant}$ sempre será conhecido, uma vez que ele é assumido como sendo igual ao valor da iteração anterior para o mesmo trecho. Para a primeira iteração, assume-se o valor de $QT_{l,t}^{ant}$ igual a 1. Assim, o problema que tem natureza não-linear torna-se linear a cada iteração.

$$PC_{l,t} = FPC_{l,t} \times QT_{l,t} \dots \dots \dots (5.18)$$

Onde:

$FPC_{l,t}$: Coeficiente de cálculo da perda de carga no trecho l no tempo t (s/m²);

$$FPC_{l,t} = \frac{8 \times f_{l,t} \times L_l \times QT_{l,t}^{ant}}{\pi^2 \times D_l^5 \times g} \dots \dots \dots (5.19)$$

Onde:

- $QT_{l,t}^{ant}$: Vazão no trecho l no tempo t na iteração anterior (m^3/s);
 $f_{l,t}$: Fator de atrito para o trecho l no tempo t ;
 L_l : Comprimento do trecho l (m);

Para o trabalho com a Fórmula de Hazen Willians, o equacionamento é semelhante alterando-se apenas o cálculo de $FPC_{l,t}$. Observa-se que a opção pela fórmula de Hazen-Willians é mais simples uma vez que não é necessário o cálculo de equações transcendentes como no caso da Fórmula Universal em que se utiliza da expressão de Colebrook-White para a determinação do fator de atrito $f_{l,t}$.

$$FPC_{l,t} = \frac{10.64 \times (QT_{l,t}^{ant})^{0.85} \times L_l}{D_l^{4.87} \times C_l^{1.85}} \dots\dots\dots(5.20)$$

Onde:

- C_l : Coeficiente C de Hazen-Willians para o trecho l ;

5.4.11 Cálculo da abertura das válvulas de controle

O cálculo da abertura de uma válvula de controle está diretamente ligado ao valor da perda de carga localizada que a mesma provoca em seu ponto de instalação. No capítulo sobre modelagem de acessórios, foram apresentados dois equacionamentos diferentes para as válvulas. No estudo de caso aplicado no trabalho, será utilizada a curva genérica, pois nos dados físicos da rede não existem dados técnicos dos fabricantes de todas as válvulas. Assim, optou-se por uma modelagem teórica da válvula.

$$K_{v,t} = \frac{PCV_{v,t} \times \pi^2 \times D_l^4 \times g}{8 \times QT_{v,t}^2} \dots\dots\dots(5.21)$$

$$X_{v,t} = 100 \times \left[1 - \left(\frac{K_{v,t}}{K_{v,máx}} \times \left(2 - \frac{K_{v,t}}{K_{v,máx}} \right) \right)^{\frac{1}{2}} \right] \dots\dots\dots(5.22)$$

Onde:

$X_{v,t}$: Abertura da válvula v no tempo t (%);

$K_{v,máx}$: Coeficiente de perda de carga localizada máxima para a válvula v no tempo t ;

$K_{v,t}$: Coeficiente de perda de carga localizada para a válvula v no tempo t ;

$QT_{v,t}$: Vazão na válvula v no tempo t (m^3/s).

5.5 Descrição do Modelo Computacional

O desenvolvimento do modelo computacional foi baseado na aplicação do Método da Teoria Linear e, para tal, foi necessário efetuar um desacoplamento hidráulico do termo quadrático da vazão para a modelagem matemática das equações dentro de uma rotina de programação linear. Este processo de cálculo foi aplicado com sucesso em VENTURINI (1997a), porém com horizonte de planejamento horário e sistema manual de iteração.

O modelo não necessita de uma solução inicial factível para o cálculo da rede hidráulica. As vazões iniciais para os cálculos dos fatores de perda de carga podem ser tomadas iguais a 1 para todos os trechos. Essa medida, praticamente, não altera o número de iterações na convergência do modelo. O módulo de programação linear que é implementado no modelo é uma rotina de otimização linear amplamente conhecida e testada no meio acadêmico e profissional que é o CONOPT pertencente ao pacote comercial GAMS (BROOKE et al., 1988).

No início do desenvolvimento da metodologia do trabalho, o módulo de otimização implementado foi o MINOS 5.1 (MURTAGH e SAUNDERS, 1987), que também se trata de um pacote de otimização muito utilizado e até indicado pelo Banco Mundial como referência para o financiamento de projetos. Nos testes do modelo com uma rede hidráulica hipotética e de pequeno porte os resultados foram positivos, demonstrando a viabilidade da técnica apresentada. Na implementação de testes em

redes maiores, como é o estudo de caso deste trabalho, o modelo não encontrou soluções factíveis. Várias modificações foram testadas na formulação matemática e mesmo assim não foi resolvido o problema das infactibilidades. O motivo do insucesso com o MINOS 5.1, advém da formulação matemática do algoritmo de busca de soluções implementado. No Apêndice – C, apresentam-se as rotinas desenvolvidas com o módulo de otimização MINOS 5.1. O GAMS/CONOPT resolveu o problema devido à diferença em seu algoritmo de otimização.

Na seqüência do trabalho, após vários estudos e avaliações, optou-se pela substituição do módulo de otimização. Depois de algumas pesquisas sobre rotinas de otimização disponíveis, verificou-se que o GAMS/CONOPT merecia ser testado, uma vez que o mesmo apresenta uma gama enorme de resultados bem sucedidos em várias áreas do conhecimento científico.

A rotina computacional do trabalho foi desenvolvida em linguagem “*FORTRAN Power Station*” e está disponível no Apêndice - B deste trabalho.

A seguir, apresenta-se um resumo das funções da rotina desenvolvida no trabalho.

1. Leitura de informações de dados físicos da rede, dados de demanda e parâmetros de processamento diretamente de arquivos de dados previamente organizados para o processamento das redes;
2. Cálculo de coeficientes, tratamento de dados e equacionamento do problema a ser resolvido;
3. Montagem de um arquivo de dados para a rotina de otimização GAMS/CONOPT proceder aos cálculos;
4. Chamada e execução da rotina de otimização;

5. Leitura do arquivo de resultados fornecido pelo GAMS;
6. Verificação da convergência das soluções;
7. Atualização das variáveis e repetição do procedimento iterativo;
8. Montagem do arquivo de resultados;
9. Alteração de pesos na função multiobjetivo e repetição dos procedimentos.

5.5.1 Alguns detalhes da modelagem de otimização

A solução do problema é obtida intervalo por intervalo até fazer a varredura de todo o horizonte de planejamento. Para cada intervalo de tempo, o procedimento iterativo é repetido até que o modelo apresente convergência para a solução procurada ou até que atinja um limite máximo no número de iterações. Quando a convergência é verificada o modelo faz uma atualização das variáveis de estado e passa para o próximo intervalo do horizonte de planejamento. Na ocorrência de soluções infactíveis, para um determinado intervalo, o modelo avisa o operador. Na figura 5.1, apresenta-se um fluxograma resumido do funcionamento do modelo.

O modelo opera a rede num horizonte de 24 horas com discretização horária, sendo que é feito uma atualização das variáveis de estado em todos os intervalos, assim os resultados de um instante (T) passam a ser dados de entrada para o instante ($T+1$).

Nos pontos de consumo, pode-se introduzir curvas de demanda específicas para cada reservatório e curvas neutras padrão para os demais pontos de demanda, que apresentam as variações da demanda em torno da média diária.

Para propiciar a execução da rotina de otimização (GAMS), é necessária a montagem de um arquivo de dados com extensão de nome (GMS) informando todas as características do problema de otimização. A rotina principal do modelo faz a leitura dos arquivos de dados e também a montagem do arquivo de entrada para o GAMS (ex.: REDE.GMS). A rotina de otimização é acionada e, de sua execução, resulta um arquivo de resultados padrão com extensão LST (ex.: REDE.LST). Nesse ponto, o modelo faz a leitura do arquivo e verifica a convergência das variáveis que sofreram o desacoplamento hidráulico. Se a convergência é positiva, o modelo incrementa o tempo e continua o procedimento até o término do horizonte, caso contrário uma nova iteração é requerida. A cada vez que é encontrada a solução ótima, para um intervalo de tempo, os valores das variáveis são escritos no arquivo de resultados, até que se completem as 24 horas.

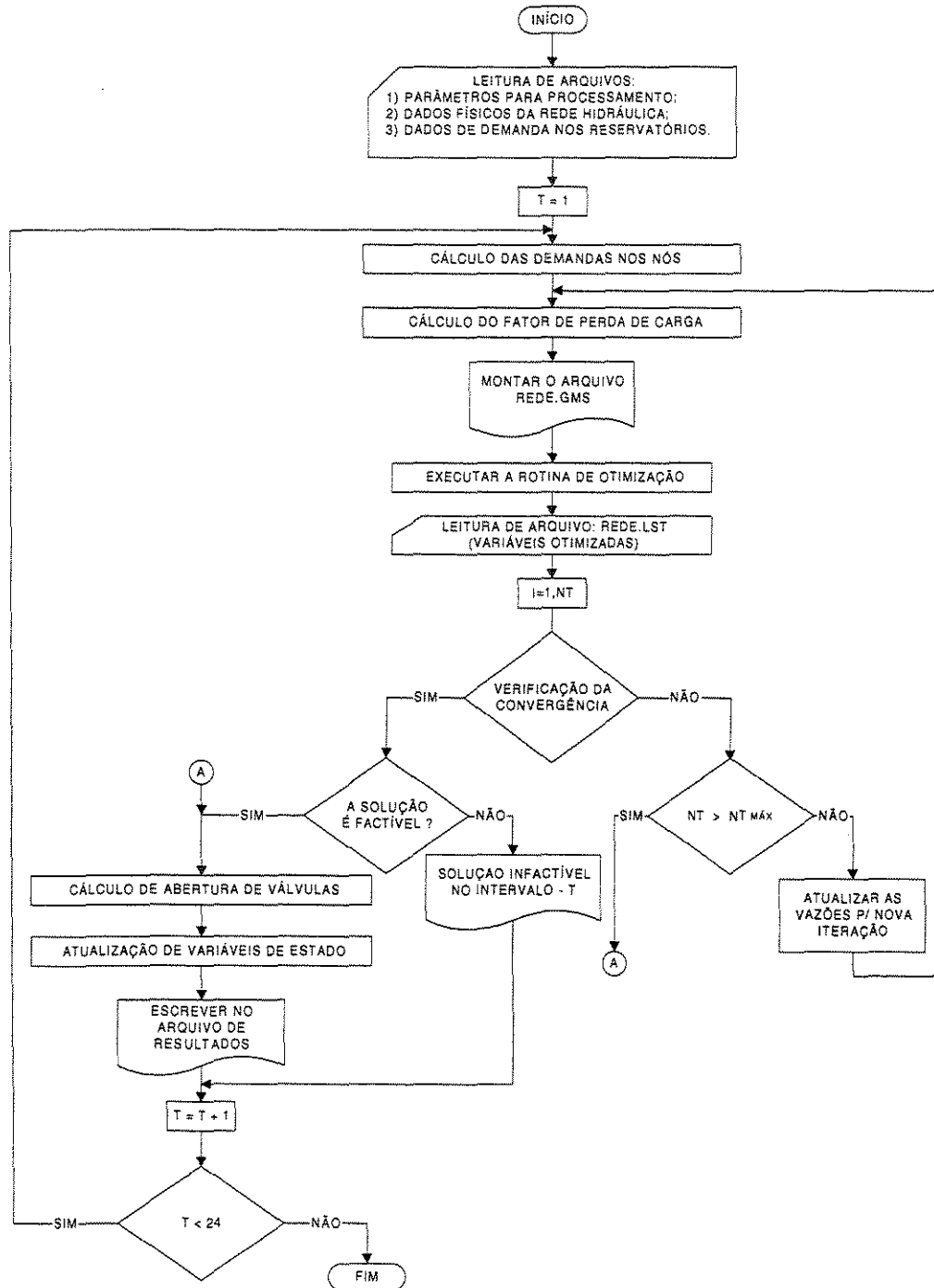


Figura 5.1 – Fluxograma do modelo desenvolvido

Para um melhor entendimento e facilidade de análise, criou-se uma série de arquivos de resultados na tentativa de padronizar as informações semelhantes. Os arquivos fornecidos pelo modelo são arquivos do tipo texto, sendo facilmente

convertidos para arquivos do Microsoft Excel e assim servindo para a geração de gráficos.

O modelo foi desenvolvido para implementar o método dos pesos como método multiobjetivo, com a função objetivo composta por variáveis associadas a coeficientes, ficando fácil fazer ponderações para a aplicação do método dos pesos. Para o caso da operação de redes, torna-se fácil analisar a sensibilidade dos vários objetivos dentro do modelo multiobjetivo com a variação conjugada dos coeficientes de pesos para cada par de funções objetivo. A seguir, apresentam-se na Tabela 5.1 os nomes dos arquivos e suas respectivas funções envolvidas na modelagem.

Tabela 5.1 - Descrição dos arquivos do modelo

Nome – Arquivo	Função
ORGANI.FOR	Rotina principal responsável pela chamada da subrotina de leitura dos arquivos de dados, preparação do arquivo de entrada para GAMS/CONOPT, ligação com outras subrotinas e geração dos arquivos de resultados;
LEITOR.FOR	Subrotina responsável pela leitura de arquivos de dados físicos da rede;
VALV.FOR	Subrotina responsável pelo cálculo da abertura das válvulas de controle;
EXECUTA.FOR	Subrotina que faz a execução do modelo;
EXECUTA.EXE	Arquivo executável que faz o processamento do modelo;
OPER.BAT	Arquivo responsável pelo acionamento do GAMS;
DEMRES.DAT	Arquivo de dados de demanda associadas aos reservatórios;
NOS.DAT	Arquivo de dados com as características dos nós da rede;
FOBJ.DAT	Arquivo de dados com os coeficientes de peso para a função multiobjetivo;

Nome – Arquivo	Função
TRECHOS.DAT	Arquivo de dados com as características dos tubos da rede;
RESERV.DAT	Arquivo de dados referente às características dos reservatórios do sistema;
VALVUL.DAT	Arquivo de dados referentes as válvulas de controle;
RESUL1.DAT	Arquivo de resultados referentes a vazão na ETA, altura manométrica e rotação no “booster”;
RESUL2.DAT	Arquivo de resultados referentes aos níveis dos reservatórios;
RESUL3.DAT	Arquivo de resultados referentes às pressões nos nós;
RESULT4.DAT	Arquivo de resultados referentes às perdas de carga nas válvulas;
RESULT5.DAT	Arquivo de resultados referentes às vazões nos trechos;
RESULT6.DAT	Arquivo de resultados referentes a porcentagem de abertura das válvulas;

6. ESTUDO DE CASO

6.1 Visitas às empresas de abastecimento de água

No início do desenvolvimento deste trabalho de pesquisa, organizou-se um ciclo de visitas às empresas responsáveis pelo abastecimento urbano de água em cidades do estado de São Paulo. Procurou-se identificar cidades com características diferentes, tais como:

- ✓ População;
- ✓ Nível social, cultural e econômico;
- ✓ Topografia;
- ✓ Tipo da empresa de abastecimento.

As visitas tiveram como objetivos principais:

1. Analisar como estão as bases de dados (cadastro físico dos sistemas) nas cidades. Observar a existência de dados, se estes eram confiáveis, se representavam a realidade de campo. Analisar o sistema de fluxo de informações na empresa;
2. Outro ponto analisado nas visitas foi a existência ou não de políticas otimizadas de operação dos sistemas e ou uso de ferramentas computacionais na operação das redes. Também foi observado como é feito o sistema de manobras nos sistemas;

3. Também procurou-se entrevistar os gestores responsáveis pelos sistemas e assim identificar os objetivos operacionais que eventualmente empregam em suas respectivas empresas.

Na Tabela 6.1, pode-se observar o nome das cidades e algumas características de seus sistemas.

Tabela 6.1 – Resumo das visitas realizadas a empresas de saneamento

Cidade Pop. Urbana *	Empresa	Situação Institucional	Principais Preocupações
Campinas 908.906	SANASA	Autarquia	Redução de perdas físicas; Atendimento à demanda
Cerquillo 24.977	SAAE	Autarquia	Atendimento à demanda; Projetos de expansão
Itatiba 71.590	SABESP	Estatat	Redução de perdas; Setorização das redes.
Limeira 230.348	Águas de Limeira	Concessão	Redução de perdas físicas; Satisfação dos usuários; Diminuição de custos.
Mogi Guaçu 114.546	SAMAE	Autarquia	Satisfação dos usuários.
Mogi Mirim 75.337	SAAE	Autarquia	Atendimento à demanda; Operação com número Excessivo de reservatórios;
São Paulo (Município) 9.839.066	SABESP	Estatat	Atendimento à demanda; Estabelecimento de regras de operação do sistema.
Valinhos 74.608	DAE	Autarquia	Atendimento à demanda; Projetos de expansão.

* Pop. urbana, fonte IBGE (1996), <http://www.sidra.ibge.gov.br>

6.2 Seleção de uma rede hidráulica para estudo de caso

Durante a realização deste trabalho algumas redes foram selecionadas para testes, porém nem todas apresentavam características físicas favoráveis que evidenciavam vantagens operacionais da aplicação de uma rotina de otimização multiobjetivo. O trabalho teve, em sua fase inicial, o desenvolvimento matemático feito sobre uma rede hipotética a qual subsidiou a elaboração de alguns trabalhos científicos publicados em congressos internacionais (XIX Congresso Latino Americano de Hidráulica e COBEM 99 – 15th Brazilian Congress of Mechanical Engineering). Na seqüência dos estudos, modelou-se uma rede hidráulica da cidade de Valinhos – SP, porém os resultados operacionais não foram satisfatórios. O motivo da insatisfação foi que a rede possuía poucos acessórios de manobra do sistema e assim a mesma não apresentava flexibilidade operacional e seus resultados eram iguais aos obtidos no regime permanente. Na verdade, a operação otimizada foi uma sucessão (24 vezes) de operações em regimes permanentes.

Depois de realizado todo ciclo de visitas, selecionou-se uma rede que apresentou dados necessários confiáveis para a modelagem e devido ao porte do sistema foi viabilizado a modelagem de otimização multiobjetivo. A rede selecionada pertence à Alça Leste do Sistema Adutor Metropolitano da Grande São Paulo e foi a que melhor se prestou à avaliação da metodologia proposta neste trabalho de pesquisa.

6.3 Dados referentes ao Subsistema Adutor – Alça Leste

Apresenta-se na Figura 6.1 a topologia da Alça Leste, onde estão contidas informações pertinentes para a modelagem da rede. É possível observar sua topologia, apresentada esquematicamente, mostrando suas principais características físicas pertinentes à modelagem que se pretende implementar. Os valores dos comprimentos e diâmetros dos tubos estão indicados na Figura 6.1, bem como as cotas topográficas dos nós.

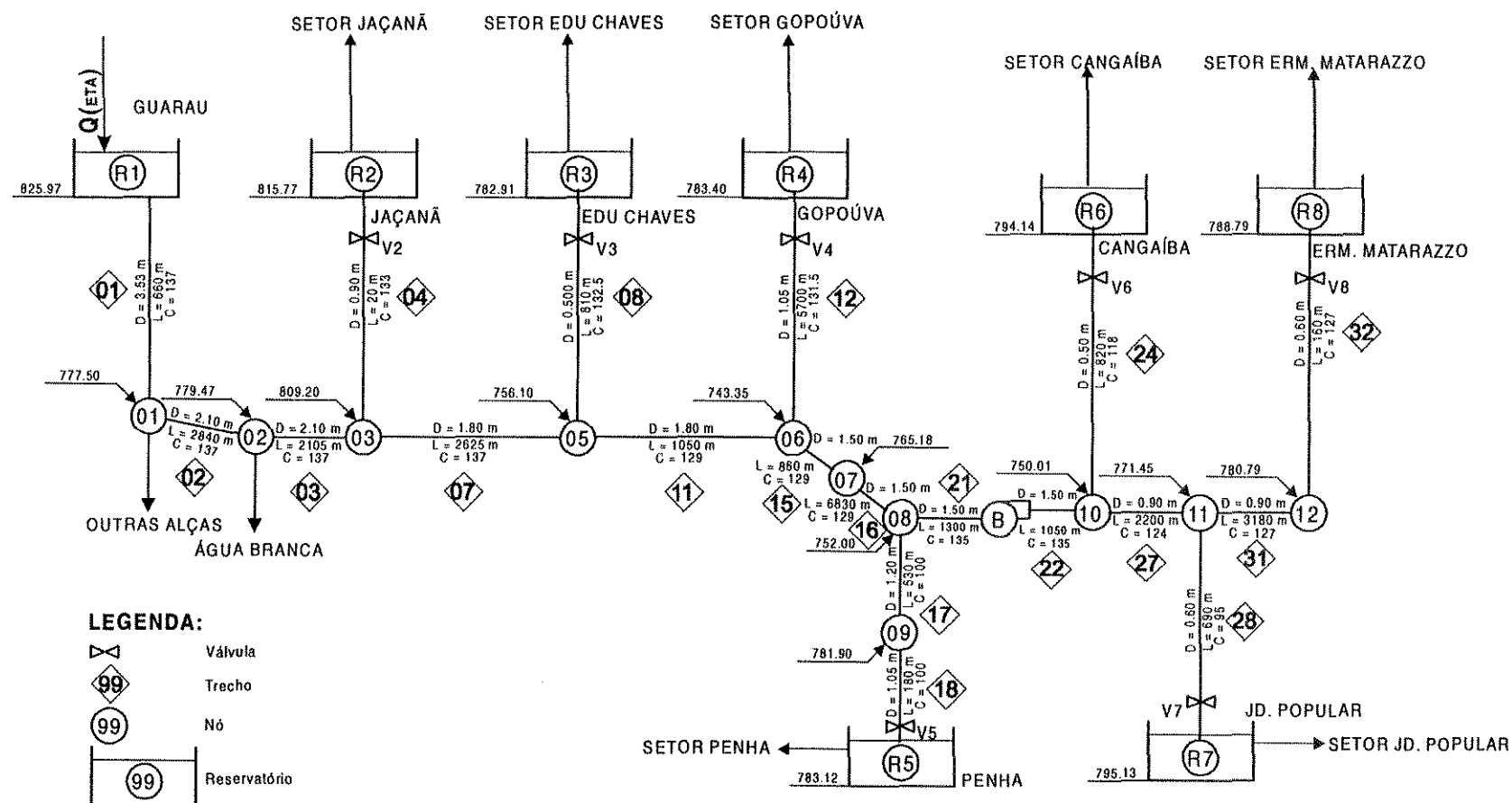


Figura 6.1 - Topologia do SubSistema Adutor Metropolitano (São Paulo) - ALÇA LESTE

Fonte: SABESP

Observa-se que o esquema apresentado foi desenhado com as devidas adaptações da rede para propiciar a modelagem da mesma. Nos trechos entre nós de demanda que apresentavam diâmetros e coeficientes de rugosidade diferentes, optou-se por encontrar representação hidráulica equivalente para o trecho, com um único valor nominal de diâmetro, comprimento e coeficiente de rugosidade que apresentasse uma perda de carga equivalente à perda de carga calculada pela soma dos trechos. Admitiu-se que as válvulas estejam instaladas bem próximas aos seus respectivos reservatórios. Para os valores de demanda aplicada aos reservatórios, trabalhou-se com a demanda média horária ao longo da semana e com isso obtiveram-se curvas de demanda a cada reservatório, conforme Tabela 6.2 e demandas associadas a outras alças na Tabela 6.3. Com essas curvas e demais dados físicos, fizeram-se algumas análises estatísticas com a finalidade de facilitar o entendimento e análise das políticas fornecidas pela modelagem. Na Tabela 6.4, pode-se encontrar os dados estatísticos de demanda a cada reservatório, bem como o volume útil para cada reservatório. Esses números têm a função de subsidiar as conclusões que serão inferidas dos sistemas, a partir da aplicação da modelagem desenvolvida.

Na Tabela 6.2, as demandas associadas a cada reservatório alimentam setores independentes do sistema. Estas demandas apresentam perfis de consumo diferentes. Do volume total aduzido que chega ao sistema através do reservatório de Guaraú, o total de 16,5% abastece a Alça Leste e o restante segue para outras alças.

Tabela 6.2 – Demanda média associada a cada reservatório

Tempo (h)	Reservatórios						
	Jaçanã (m ³ /s)	Edu Chaves (m ³ /s)	Gopo úva (m ³ /s)	Penha (m ³ /s)	Cangaíba (m ³ /s)	Jd. Popular (m ³ /s)	Erm. Matarazzo (m ³ /s)
1	0,498	0,720	1,969	0,313	0,387	0,218	0,534
2	0,425	0,705	1,879	0,267	0,334	0,193	0,522
3	0,381	0,687	1,799	0,237	0,289	0,166	0,497
4	0,375	0,681	1,766	0,230	0,271	0,152	0,484
5	0,408	0,694	1,797	0,247	0,289	0,157	0,494
6	0,472	0,725	1,888	0,286	0,341	0,183	0,531
7	0,558	0,771	2,024	0,340	0,418	0,226	0,589
8	0,652	0,824	2,183	0,401	0,509	0,278	0,660
9	0,745	0,879	2,343	0,462	0,601	0,333	0,735
10	0,824	0,927	2,482	0,515	0,681	0,383	0,802
11	0,882	0,963	2,583	0,556	0,741	0,422	0,855
12	0,914	0,984	2,636	0,580	0,773	0,446	0,887
13	0,919	0,987	2,637	0,587	0,776	0,454	0,895
14	0,900	0,975	2,591	0,578	0,753	0,447	0,880
15	0,862	0,950	2,511	0,555	0,709	0,426	0,847
16	0,813	0,918	2,412	0,525	0,653	0,397	0,803
17	0,762	0,884	2,315	0,493	0,596	0,366	0,755
18	0,719	0,856	2,238	0,465	0,548	0,339	0,712
19	0,690	0,837	2,197	0,445	0,528	0,320	0,683
20	0,678	0,831	2,196	0,435	0,508	0,312	0,669
21	0,677	0,833	2,224	0,432	0,513	0,312	0,669
22	0,673	0,835	2,249	0,429	0,517	0,311	0,669
23	0,638	0,818	2,207	0,406	0,486	0,292	0,645
24	0,527	0,748	1,995	0,336	0,365	0,224	0,556

Tabela 6.3 – Demanda média associada a outras alças

Tempo (h)	Outras Alças	
	Água Branca (m ³ /s)	Outras Alças (m ³ /s)
1	26,973	0,999
2	16,335	0,605
3	17,631	0,653
4	16,983	0,629
5	19,791	0,733
6	20,169	0,747
7	25,434	0,942
8	29,052	1,076
9	30,672	1,136
10	39,609	1,467
11	41,175	1,525
12	39,447	1,461
13	34,533	1,279
14	30,726	1,138
15	29,349	1,087
16	29,106	1,078
17	29,646	1,098
18	33,966	1,258
19	37,449	1,387
20	33,318	1,234
21	24,111	0,893
22	19,224	0,712
23	20,169	0,747
24	14,256	0,528
Média	27,464	1,017
Desv.Pa	8,058	0,298
CV	29,34%	29,34%

Tabela 6.4 – Estatística da demanda a cada reservatório

Reservatórios	Dem. Média (m ³ /s)	Desv. Padrão (m ³ /s)	Coef. Variação	Volume Útil (m ³)	α
Jaçanã	0,666	0,177	26,54%	7825	13,60%
Edu Chaves	0,835	0,101	12,10%	23103	32,03%
Gopoúva	2,213	0,278	12,55%	48858	25,55%
Penha	0,422	0,116	27,61%	15865	43,51%
Cangaíba	0,524	0,163	31,15%	3678	8,12%
Jd. Popular	0,307	0,099	32,22%	8825	33,27%
Erm. Matarazzo	0,682	0,136	19,99%	24580	41,71%

Onde:

$$\alpha = \frac{V_{\text{útil}}}{\text{Demanda} \times 24 \text{ horas}} \times 100 \quad (\%) \dots \dots \dots (6.1)$$

O coeficiente α representa a percentagem da demanda média diária que o volume útil do reservatório consegue atender. Quanto maior o valor de α e quanto menor o valor do coeficiente de variação da demanda mais fácil será o atendimento da demanda a partir de tal reservatório. Os parâmetros α e o coeficiente de variação são indicadores da flexibilidade operacional do sistema.

Observa-se na Tabela 6.4 que o reservatório Ermelino Matarazzo apresenta coeficiente de variação da demanda relativamente baixo (19,99%) e coeficiente α relativamente alto (41,71%). Conclui-se desses números que o reservatório apresenta boa flexibilidade operacional. Já o reservatório Cangaíba apresenta coeficiente α baixo (8,12%) e coeficiente de variação alto (31,15%) o que dificulta a flexibilidade operacional. Os demais reservatórios ficam em situações intermediárias.

Funções Objetivo Seleccionadas:

1) Minimização da flutuação na vazão da ETA.

$$Z_1 = \sum_{i=1}^{24} |\Delta Q| \dots \dots \dots (6.2)$$

2) Minimização dos custos com energia elétrica;

$$Z_2 = \sum_{i=1}^{24} Q_{\text{BOOSTER}} \dots \dots \dots (6.3)$$

3) Maximização dos níveis dos reservatórios.

$$Z_3 = \left(- \sum_{i=1}^{24} \sum_{j=1}^8 NRF_{i,j} \right) \dots \dots \dots (6.4)$$

4) Minimização da Pressão Média nos Nós.

$$Z_4 = \sum_{i=1}^{24} \sum_{k=1}^n P_{i,k} \dots\dots\dots(6.5)$$

5) Minimização de Perda de Carga nas Válvulas:

$$Z_5 = \sum_{i=1}^{24} \sum_{l=1}^7 PCV_{i,l} \dots\dots\dots(6.6)$$

6.4 Apresentação de resultados

De posse dos dados da Alça Leste, do estudo de funções objetivo e da metodologia desenvolvida, iniciou-se a fase de aplicação. Conforme apresentado na metodologia, aplica-se o Método dos Pesos para a abordagem multiobjetivo do problema. As cinco funções objetivo foram combinadas duas a duas com onze variações de pesos entre zero e um, levando a um conjunto de cento e dez possíveis combinações, já excluindo as combinações comutativas. Para cada combinação em que o modelo faz o processamento (com horizonte de vinte e quatro horas), são necessárias aproximadamente oitocentas iterações do “solver” de otimização. Assim, verifica-se que o “solver” foi utilizado cerca de oitenta e oito mil vezes para o tratamento do problema. O tempo de processamento para uma combinação de pesos, para o horizonte de 24 horas, em um microcomputador Pentium III (450 MHz) com 128 Mb de memória Ram é de aproximadamente 4 minutos. As funções objetivo utilizadas no processamento já foram apresentadas no capítulo de desenvolvimento do modelo. Algumas variáveis foram padronizadas (multiplicadas por coeficientes de correção) para ficarem todas com ordens de grandezas semelhantes, com o objetivo de apresentarem maior sensibilidade à variação de pesos. Estabeleceram-se formas gráficas sistematizadas para representar os resultados. As curvas de soluções não-dominadas não apresentam a regra operacional a ser implementada na operação do sistema, e sim mostram os “trade-offs” entre as funções. Com finalidade ilustrativa, apresentam-se no Apêndice – A os resultados para uma combinação de pesos, no caso a combinação de pesos C12-11, que representa a combinação entre as funções 1 e 2 para o arranjo número 11 de pesos. Na equação 6.7 apresenta-se a forma de como são geradas as combinações de pesos.

$$(C_{a,b})_i = [((1 - w_i) \times Z_a) + (w_i \times Z_b)]_i \dots\dots\dots (6.7)$$

Onde:

$(C_{a,b})_i$: Combinação de pesos i entre as funções a e b ;

w_i : Valor do peso i ;

$a = \{1,2,3,4,5\}$

$b = \{1,2,3,4,5\}$

$i = \{1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11\}$

6.4.1 Análise multiobjetivo para as funções Z_1 e Z_2

A função objetivo Z_1 busca obter a minimização da flutuação da vazão na ETA, o que facilita e melhora a eficiência no sistema de tratamento de água. Já a função objetivo Z_2 busca a minimização da vazão bombeada no “booster”, pois, desconsiderando-se a diferenciação nas tarifas por horários, uma minimização na vazão bombeada significa uma minimização nos gastos com energia elétrica. Na tabela 6.5, apresentam-se os coeficientes de peso.

Tabela 6.5 - Combinações de Pesos - Funções Z_1 e Z_2

Combinações de Pesos	Pesos associados a cada função objetivo				
	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	Z_5
	w_1	w_2	w_3	w_4	w_5
C12-1	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0
C12-2	0,9	0,1	0,0	0,0	0,0
C12-3	0,8	0,2	0,0	0,0	0,0
C12-4	0,7	0,3	0,0	0,0	0,0
C12-5	0,6	0,4	0,0	0,0	0,0
C12-6	0,5	0,5	0,0	0,0	0,0
C12-7	0,4	0,6	0,0	0,0	0,0
C12-8	0,3	0,7	0,0	0,0	0,0
C12-9	0,2	0,8	0,0	0,0	0,0
C12-10	0,1	0,9	0,0	0,0	0,0
C12-11	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0

Observa-se da Figura 6.2 que a minimização da variação da vazão média na ETA provoca um aumento na vazão no “booster” e vice versa. Observa-se também que para um grupo de variação de pesos (C12-3, C12-4, C12-5, C12-6, C12-7, C12-8, C12-9, C12-10) a solução é a mesma. Isto ocorre devido à sensibilidade que as variáveis apresentam em relação às combinações de pesos.

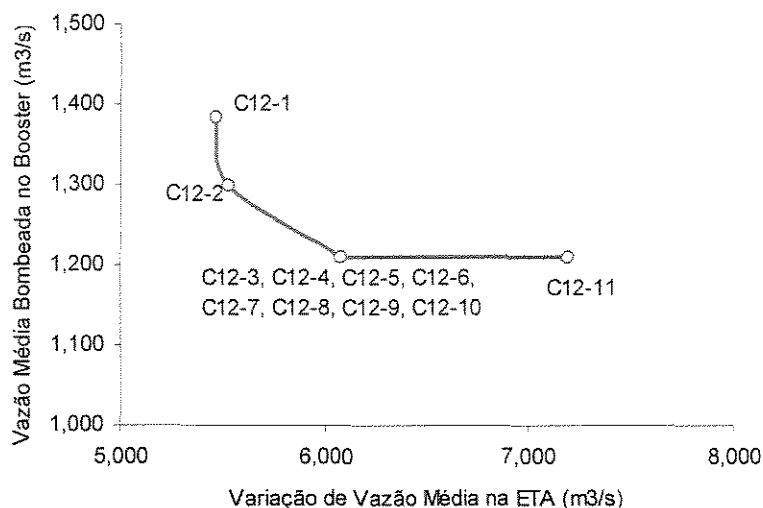


Figura 6.2 – Curva de soluções não-dominadas entre as funções objetivo Z_1 e Z_2 (Valores Médios)

Na Figura 6.3, traçou-se a curva de soluções não-dominadas para os valores máximos, verificando-se o comportamento relativamente similar ao da curva para valores médios. Na sequência, apresentam-se na Figura 6.4 as situações correspondentes ao valor médio e máximo em outra forma de visualização. Verifica-se que para as combinações C12-3 a C12-10 as soluções são iguais e apresentam um melhor compromisso entre os objetivos, tanto para a situação de médias, como para as situações de máximos.

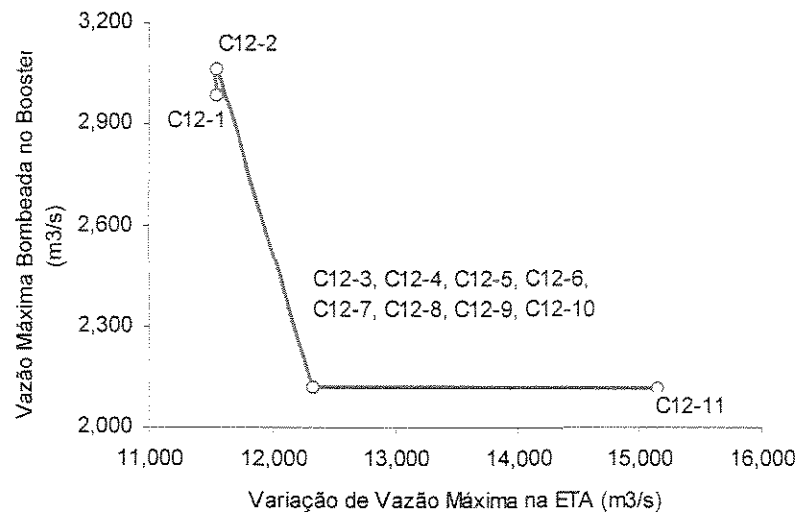


Figura 6.3 – Curva de soluções não-dominadas entre as funções objetivo Z_1 e Z_2 (Valores Máximos)

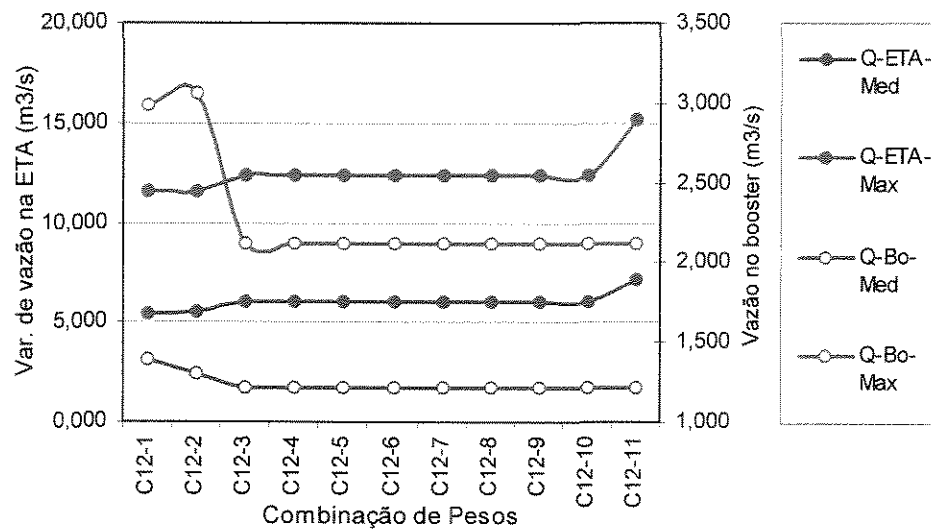


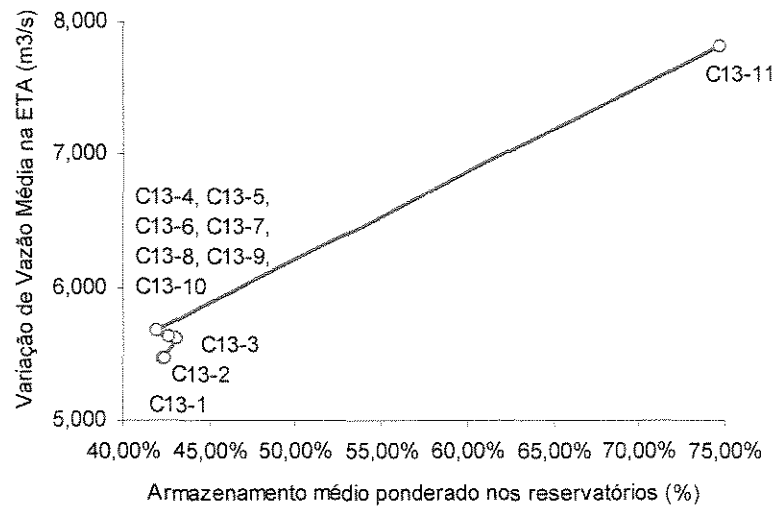
Figura 6.4 – Curvas integradas de soluções das funções objetivo Z_1 e Z_2

6.4.2 Análise multiobjetivo para as funções Z_1 e Z_3 :

A função objetivo Z_1 busca obter a minimização da flutuação da vazão na ETA, já a função objetivo Z_3 busca a maximização dos níveis dos reservatórios, que é objetivo dos gestores dos sistemas que buscam medidas operativas que visam maximizar níveis de armazenamento (buscando melhor confiabilidade operativa).

Tabela 6.6 - Combinações de Pesos - Funções Z_1 e Z_3

Combinações de Pesos	Pesos associados a cada função objetivo				
	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	Z_5
	W_1	W_2	W_3	W_4	W_5
C13-1	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0
C13-2	0,9	0,0	0,1	0,0	0,0
C13-3	0,8	0,0	0,2	0,0	0,0
C13-4	0,7	0,0	0,3	0,0	0,0
C13-5	0,6	0,0	0,4	0,0	0,0
C13-6	0,5	0,0	0,5	0,0	0,0
C13-7	0,4	0,0	0,6	0,0	0,0
C13-8	0,3	0,0	0,7	0,0	0,0
C13-9	0,2	0,0	0,8	0,0	0,0
C13-10	0,1	0,0	0,9	0,0	0,0
C13-11	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0

Figura 6.5 – Curva de soluções não-dominadas entre as funções objetivo Z_1 e Z_3 (Valores Médios)

Da curva apresentada na Figura 6.5, observa-se que, como no primeiro caso, diminuir a flutuação da vazão na ETA implica em diminuir o armazenamento nos reservatórios. A Figura 6.6 parece ser mais interessante para a visualização dos resultados e pode-se verificar visualmente que as soluções para as combinações C13-3 a C13-8 são as que apresentam melhor solução de compromisso para este problema.

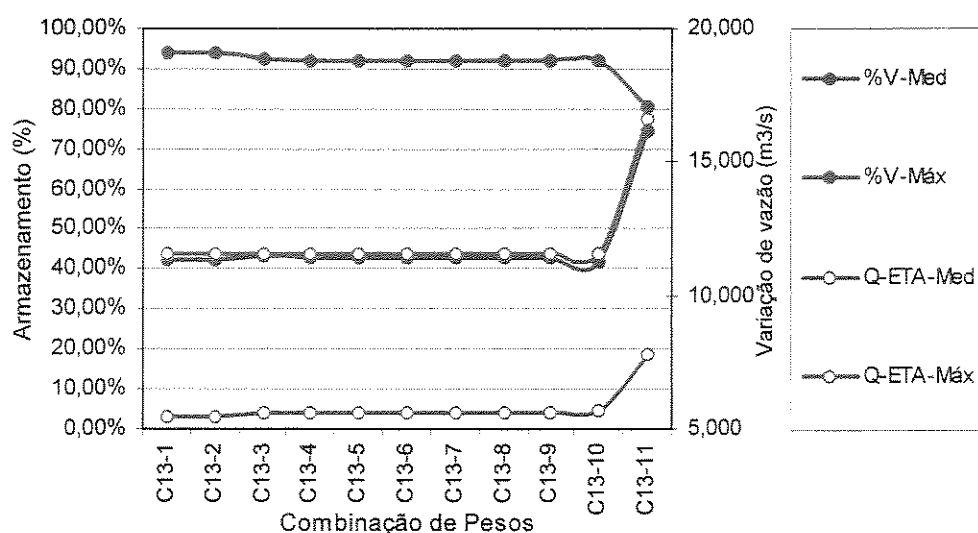


Figura 6.6 – Curvas integradas de soluções das funções objetivo Z_1 e Z_3

6.4.3 Análise multiobjetivo para as funções Z_1 e Z_4 :

A função objetivo Z_1 busca obter a minimização da flutuação da vazão na ETA, já a função objetivo Z_4 busca a minimização das pressões nos nós da rede. A função Z_4 está diretamente correlacionada com as perdas de água nos sistemas, pois na realidade existem orifícios nas redes e maiores cargas implicam em maiores perdas.

Tabela 6.7 - Combinações de pesos – Funções Z_1 e Z_4

Combinações de Pesos	Pesos associados a cada função objetivo				
	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	Z_5
	W_1	W_2	W_3	W_4	W_5
C14-1	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0
C14-2	0,9	0,0	0,0	0,1	0,0
C14-3	0,8	0,0	0,0	0,2	0,0
C14-4	0,7	0,0	0,0	0,3	0,0
C14-5	0,6	0,0	0,0	0,4	0,0
C14-6	0,5	0,0	0,0	0,5	0,0
C14-7	0,4	0,0	0,0	0,6	0,0
C14-8	0,3	0,0	0,0	0,7	0,0
C14-9	0,2	0,0	0,0	0,8	0,0
C14-10	0,1	0,0	0,0	0,9	0,0
C14-11	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0

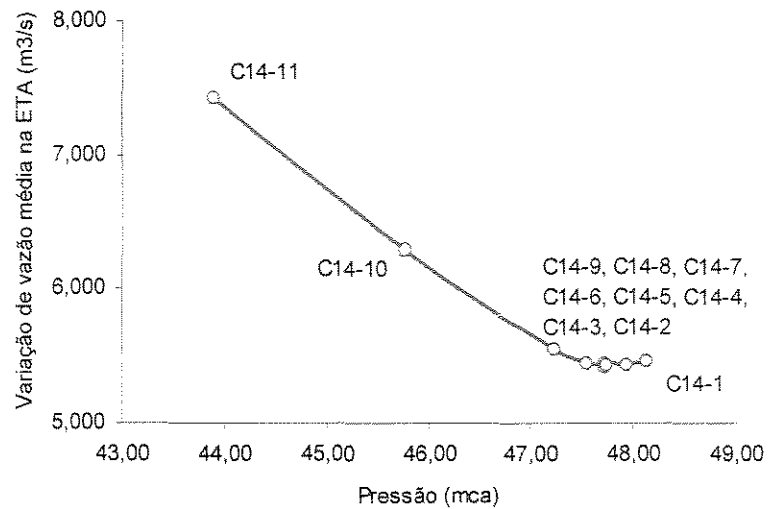


Figura 6.7 – Curva de soluções não-dominadas entre as funções objetivo Z_1 e Z_4 (Valores Médios)

Verifica-se na Figura 6.7 que uma diminuição na flutuação da vazão na ETA acarreta no aumento da pressão média nos nós e vice versa. Na Figura 6.8 (valores máximos) a relação é a mesma mas verifica-se oscilação. Para analisar as combinações, a Figura 6.9 é mais clara e dela tiramos que as combinações C14-3 a C14-8 representam melhores compromissos entre as soluções.

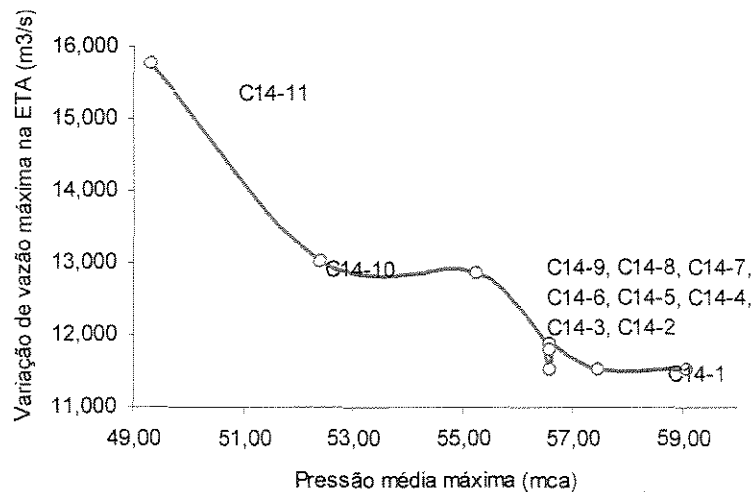


Figura 6.8 – Curva de soluções não-dominadas entre as funções objetivo Z_1 e Z_4 (Valores Máximos)

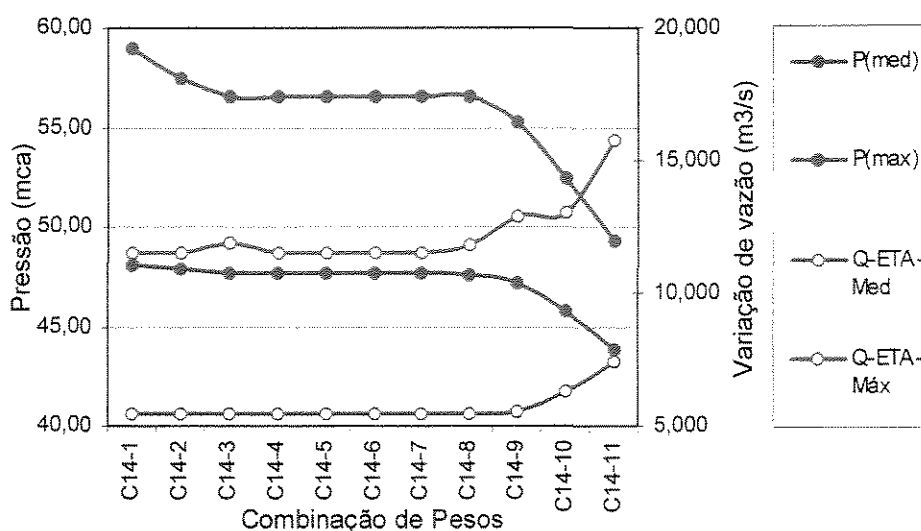


Figura 6.9 – Curvas integradas de soluções das funções objetivo Z_1 e Z_4

6.4.4 Análise multiobjetivo para as funções Z_1 e Z_5 :

A função objetivo Z_1 busca obter a minimização da flutuação da vazão na ETA, a outra função combinada é Z_5 que almeja minimizar as perdas de cargas nas válvulas, haja vista que essas perdas são perdas de energia que, de alguma forma, entraram no sistema.

Tabela 6.8 - Combinações de pesos – Funções Z_1 e Z_5

Combinações de Pesos	Pesos associados a cada função objetivo				
	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	Z_5
	W_1	W_2	W_3	W_4	W_5
C15-1	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0
C15-2	0,9	0,0	0,0	0,0	0,1
C15-3	0,8	0,0	0,0	0,0	0,2
C15-4	0,7	0,0	0,0	0,0	0,3
C15-5	0,6	0,0	0,0	0,0	0,4
C15-6	0,5	0,0	0,0	0,0	0,5
C15-7	0,4	0,0	0,0	0,0	0,6
C15-8	0,3	0,0	0,0	0,0	0,7
C15-9	0,2	0,0	0,0	0,0	0,8
C15-10	0,1	0,0	0,0	0,0	0,9
C15-11	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0

Apresenta-se na Figura 6.10 a curva de soluções não dominadas para a variação de vazão média na ETA e a perda de carga média nas válvulas, verificou-se um

comportamento um pouco oscilante entre algumas soluções, região entre C15-2, C15-3 e C15-4. Já nas Figuras 6.11 e 6.12, apresentaram-se curvas específicas para a válvula 05, associada ao reservatório Penha, que, sistematicamente, apresentava perda de carga localizada muito superior às demais válvulas. No caso da Figura 6.12, somente foram plotados os pontos, pois não ocorre uma função monotônica.

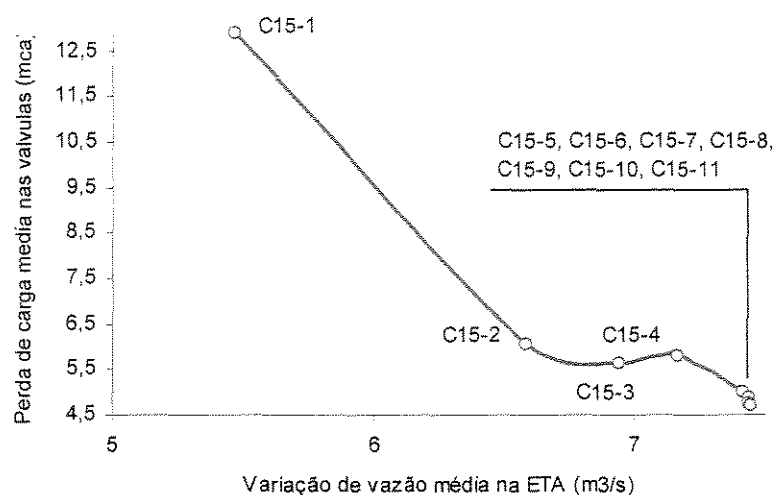


Figura 6.10 – Curva de soluções não-dominadas entre as funções objetivo Z_1 e Z_5 (Valores Médios)

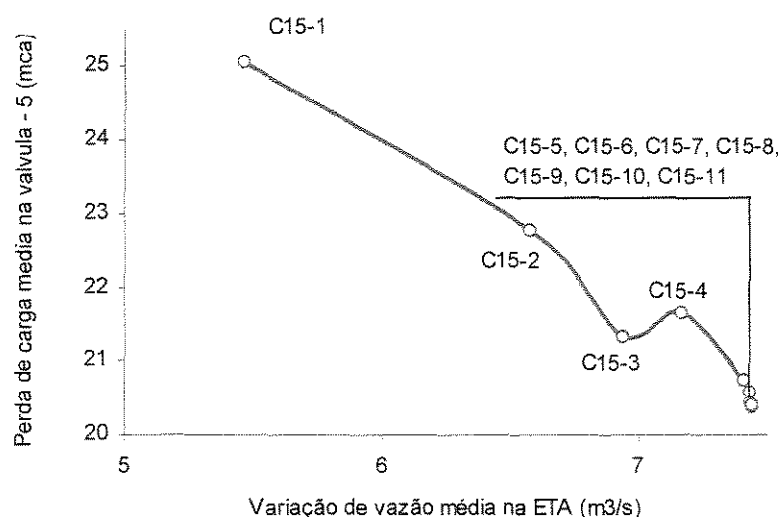


Figura 6.11 – Curva de soluções não-dominadas entre as funções objetivo Z_1 e Z_5 (Valores Médios – Válvula 5)

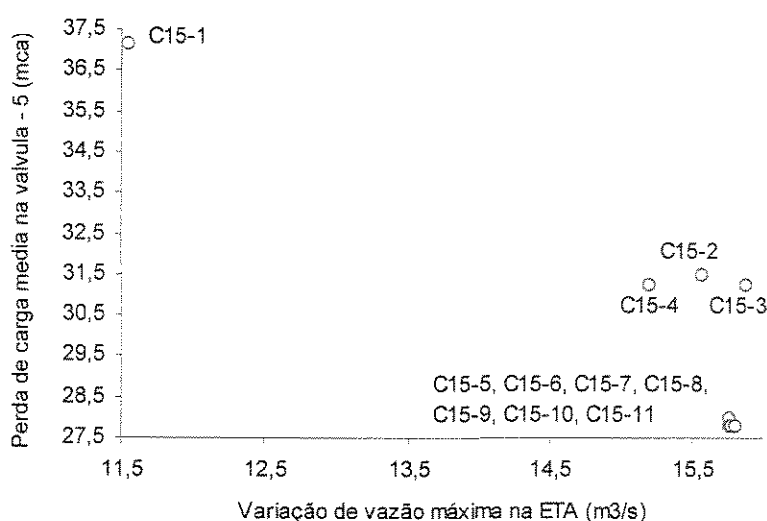


Figura 6.12 – Curva de soluções não-dominadas entre as funções objetivo Z_1 e Z_5 (Valores Máximos)

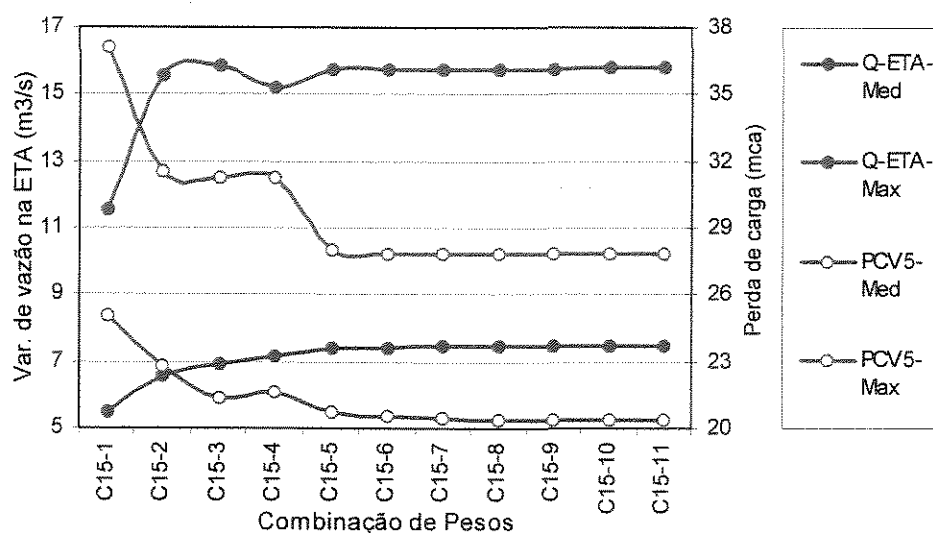


Figura 6.13 – Curvas integradas de soluções das funções objetivo Z_1 e Z_5

6.4.5 Análise multiobjetivo para as funções Z_2 e Z_3 :

A função objetivo Z_2 busca a minimização da vazão bombeada no “booster”, já a função Z_3 procura pela maximização dos armazenamentos dos reservatórios e tem seus resultados apresentados a seguir:

Tabela 6.9 - Combinações de pesos – Funções Z_2 e Z_3

Combinações de Pesos	Pesos associados a cada função objetivo				
	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	Z_5
	w_1	w_2	w_3	w_4	w_5
C23-1	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0
C23-2	0,0	0,9	0,1	0,0	0,0
C23-3	0,0	0,8	0,2	0,0	0,0
C23-4	0,0	0,7	0,3	0,0	0,0
C23-5	0,0	0,6	0,4	0,0	0,0
C23-6	0,0	0,5	0,5	0,0	0,0
C23-7	0,0	0,4	0,6	0,0	0,0
C23-8	0,0	0,3	0,7	0,0	0,0
C23-9	0,0	0,2	0,8	0,0	0,0
C23-10	0,0	0,1	0,9	0,0	0,0
C23-11	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0

Observa-se tanto na Figura 6.14 (valores médios) como na Figura 6.15 (valores máximos) que existe ponto limite que define uma mudança brusca em um dos objetivos. Na Figura 6.14, verifica-se que exceto a solução C23 –11, todas as outras apresentam um mesmo valor para a vazão média no booster.

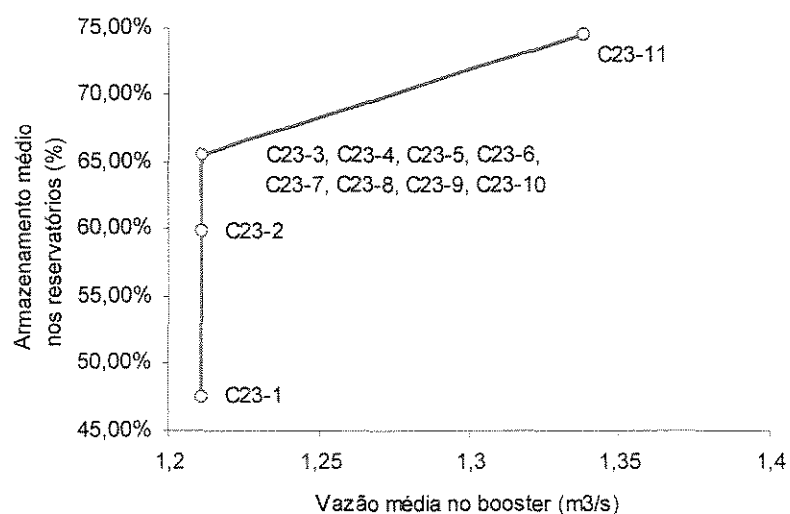


Figura 6.14 – Curva de soluções não-dominadas entre as funções objetivo Z_2 e Z_3 (Valores Médios)

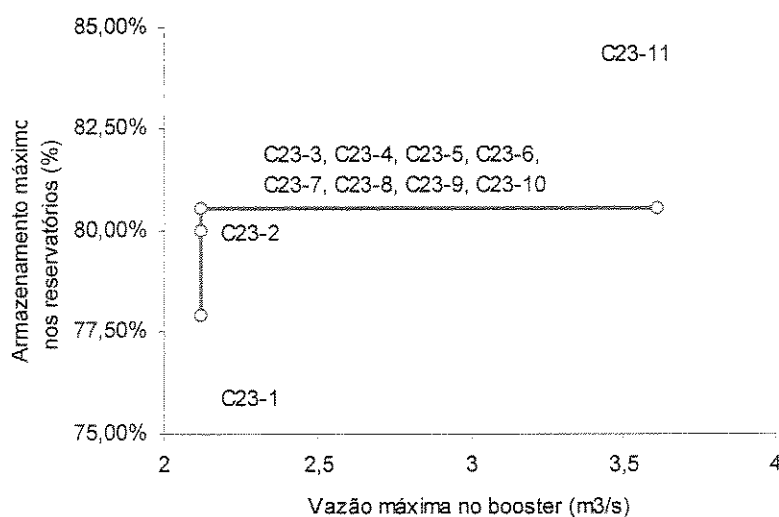


Figura 6.15 – Curva de soluções não-dominadas entre as funções objetivo Z_2 e Z_3 (Valores Máximos)

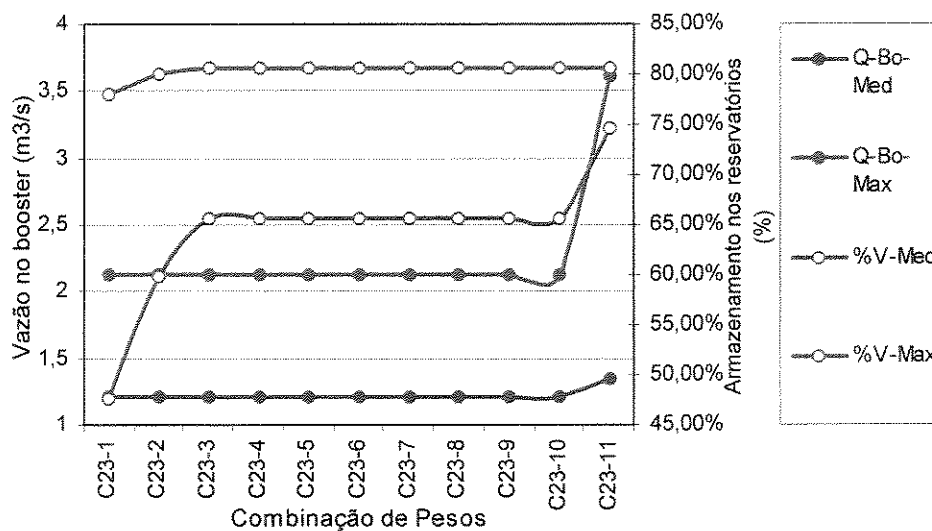


Figura 6.16 – Curvas integradas de soluções das funções objetivo Z_2 e Z_3

6.4.6 Análise multiobjetivo para as funções Z_2 e Z_4 :

A função objetivo Z_2 busca a minimização da vazão bombeada no “booster”, já a função Z_4 procura pela minimização da pressão nos nós:

Tabela 6.10 - Combinações de pesos – Funções Z_2 e Z_4

Combinações de Pesos	Pesos associados a cada função objetivo				
	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	Z_5
	W_1	W_2	W_3	W_4	W_5
C24-1	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0
C24-2	0,0	0,9	0,0	0,1	0,0
C24-3	0,0	0,8	0,0	0,2	0,0
C24-4	0,0	0,7	0,0	0,3	0,0
C24-5	0,0	0,6	0,0	0,4	0,0
C24-6	0,0	0,5	0,0	0,5	0,0
C24-7	0,0	0,4	0,0	0,6	0,0
C24-8	0,0	0,3	0,0	0,7	0,0
C24-9	0,0	0,2	0,0	0,8	0,0
C24-10	0,0	0,1	0,0	0,9	0,0
C24-11	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0

Nas Figuras 6.17, 6.18 e 6.19 verifica-se claramente o conflito entre as duas funções objetivo (minimizar vazão média no “booster” e minimizar pressão média nos nós. Pode-se conseguir a solução de melhor compromisso facilmente através da Figura 6.19 (combinações C24 – 2 a C24 – 10) e conclui-se que as combinações extremas não são recomendadas (C24 – 1 e C24 – 11).

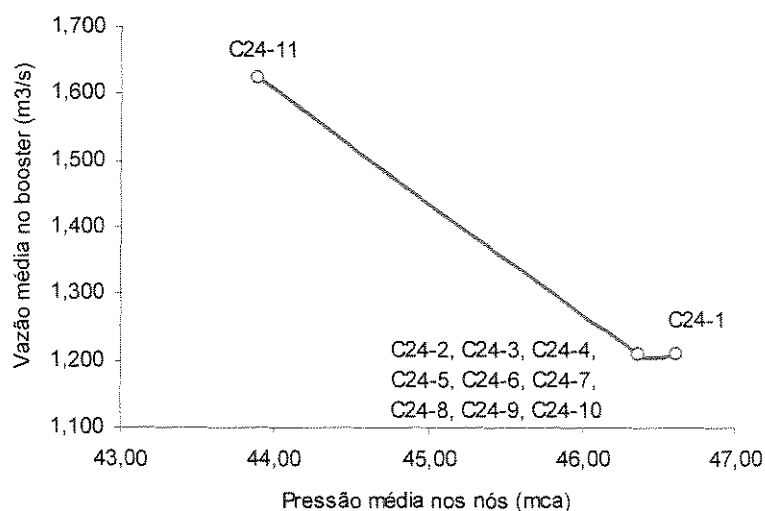


Figura 6.17 – Curva de soluções não-dominadas entre as funções objetivo Z_2 e Z_4 (Valores Médios)

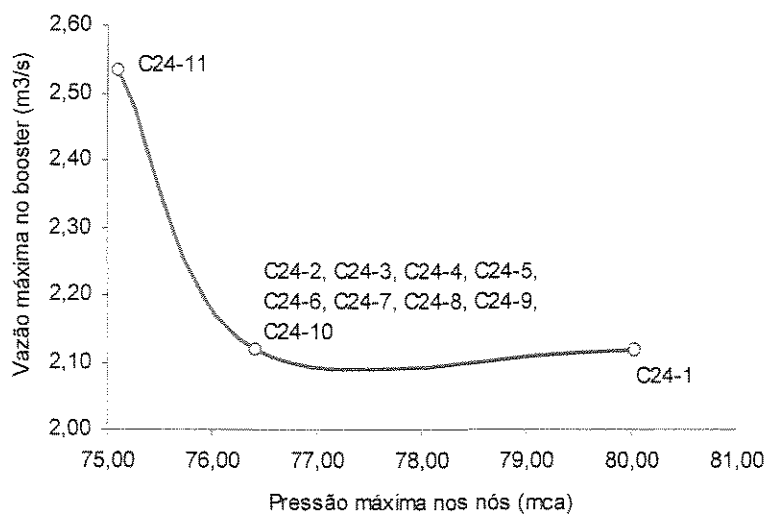


Figura 6.18 – Curva de soluções não-dominadas entre as funções objetivo Z_2 e Z_4 (Valores Máximos)

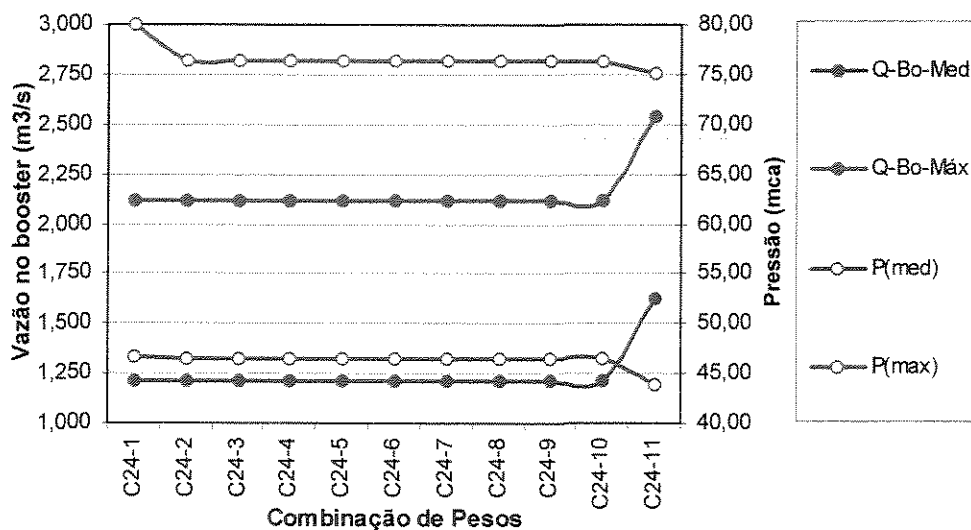


Figura 6.19 – Curvas integradas de soluções das funções objetivo Z_2 e Z_4

6.4.7 Análise multiobjetivo para as funções Z_2 e Z_5 :

A função objetivo Z_2 busca a minimização da vazão bombeada no “booster”, já a função Z_5 procura pela minimização da perda de carga nas válvulas:

Tabela 6.11 - Combinações de pesos – Funções Z_2 e Z_5

Combinações de Pesos	Pesos associados a cada função objetivo				
	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	Z_5
	w_1	w_2	w_3	w_4	w_5
C25-1	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0
C25-2	0,0	0,9	0,0	0,0	0,1
C25-3	0,0	0,8	0,0	0,0	0,2
C25-4	0,0	0,7	0,0	0,0	0,3
C25-5	0,0	0,6	0,0	0,0	0,4
C25-6	0,0	0,5	0,0	0,0	0,5
C25-7	0,0	0,4	0,0	0,0	0,6
C25-8	0,0	0,3	0,0	0,0	0,7
C25-9	0,0	0,2	0,0	0,0	0,8
C25-10	0,0	0,1	0,0	0,0	0,9
C25-11	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0

Para as combinações C25 verificou-se que para valores máximos a função não apresenta monotonicidade e assim somente representou-se os pontos. A ocorrência deste fato advém de que estamos tratando de pontos máximos e que representam extremos advindos do resultado da otimização.

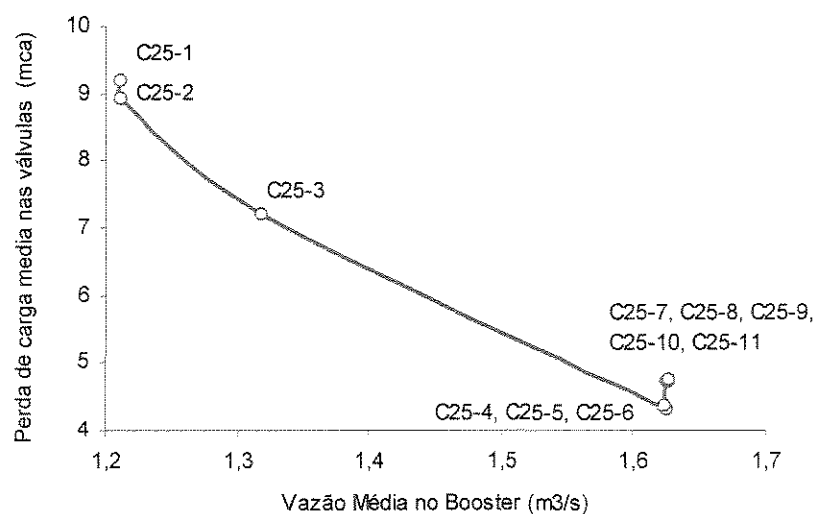


Figura 6.20 – Curva de soluções não-dominadas entre as funções objetivo Z_2 e Z_5 (Valores Médios)

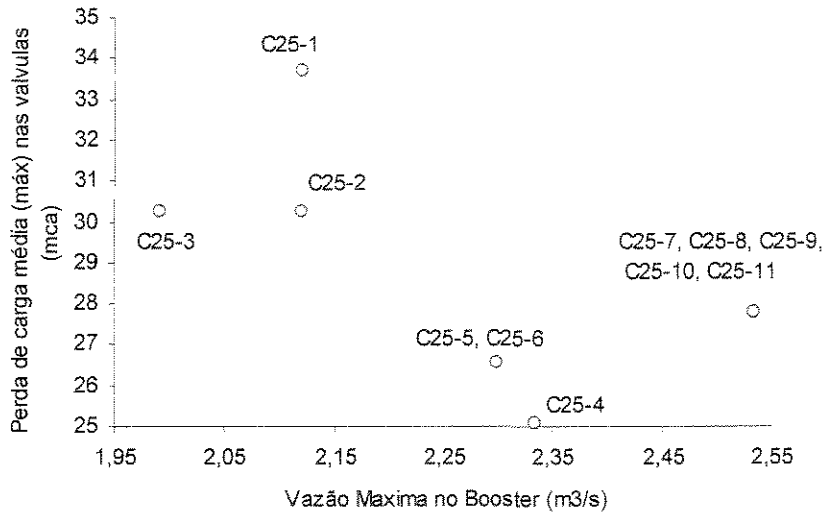


Figura 6.21 – Curva de soluções não-dominadas entre as funções objetivo Z_2 e Z_5 (Valores Máximos)

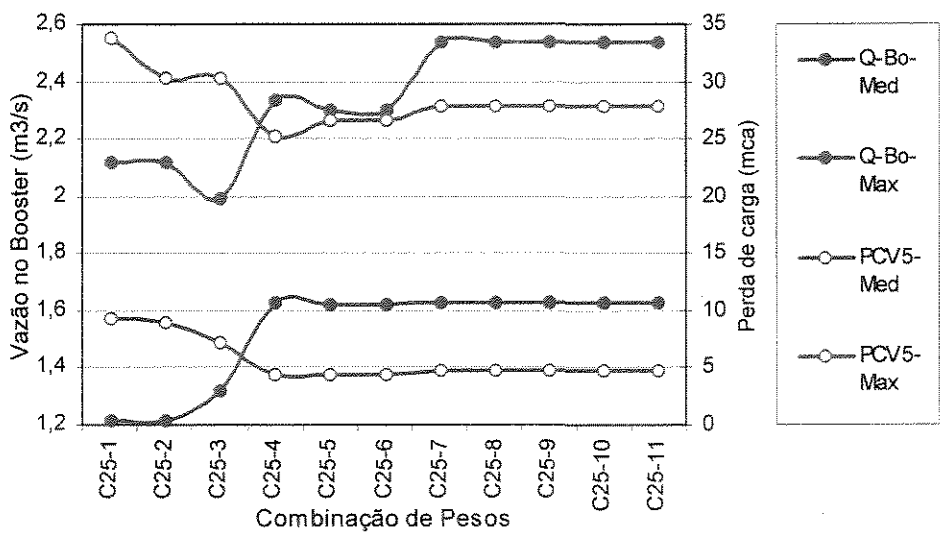


Figura 6.22 – Curvas integradas de soluções das funções objetivo Z_2 e Z_5

6.4.8 Análise multiobjetivo para as funções Z_3 e Z_4 :

A função objetivo Z_3 busca a maximização dos níveis dos reservatórios, já a função Z_4 procura pela minimização da pressão nos nós:

Tabela 6.12 - Combinações de Pesos – Funções Z_3 e Z_4

Combinações de Pesos	Pesos associados a cada função objetivo				
	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	Z_5
	w_1	w_2	w_3	w_4	w_5
C34-1	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0
C34-2	0,0	0,0	0,9	0,1	0,0
C34-3	0,0	0,0	0,8	0,2	0,0
C34-4	0,0	0,0	0,7	0,3	0,0
C34-5	0,0	0,0	0,6	0,4	0,0
C34-6	0,0	0,0	0,5	0,5	0,0
C34-7	0,0	0,0	0,4	0,6	0,0
C34-8	0,0	0,0	0,3	0,7	0,0
C34-9	0,0	0,0	0,2	0,8	0,0
C34-10	0,0	0,0	0,1	0,9	0,0
C34-11	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0

Nas Figuras 6.23, 6.24 e 6.25 visualiza-se que a combinação de pesos C34 – 1 apresenta grande armazenamento médio nos reservatórios, porém pressões elevadas nos nós. A solução C34 – 2 reduz a pressão média nos nós e também o armazenamento médio nos reservatórios. As soluções C34 – 3 a C34 – 11 apresentam um melhor desempenho pois trabalham num nível de pressão mínimo encontrado e num patamar de armazenamento razoável.

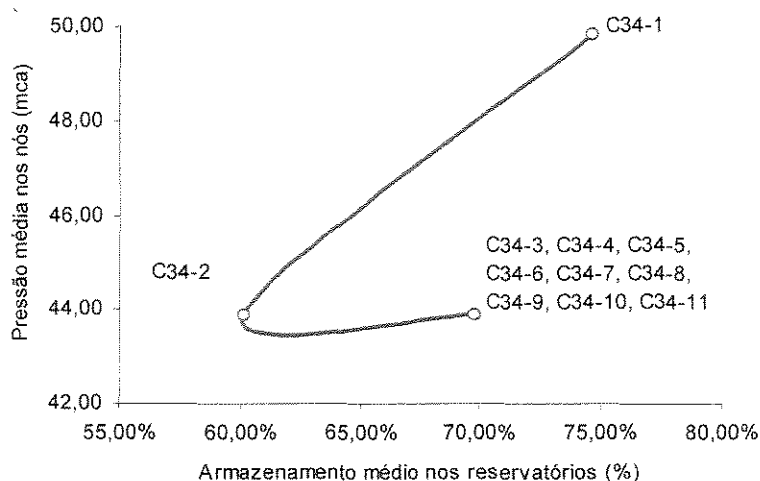


Figura 6.23 – Curva de soluções não-dominadas entre as funções objetivo Z_3 e Z_4 (Valores Médios)

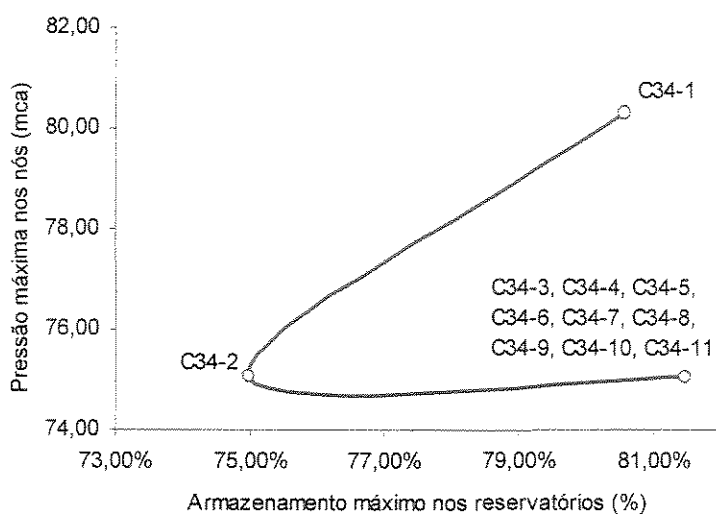


Figura 6.24 – Curva de soluções não-dominadas entre as funções objetivo Z_3 e Z_4 (Valores Máximos)

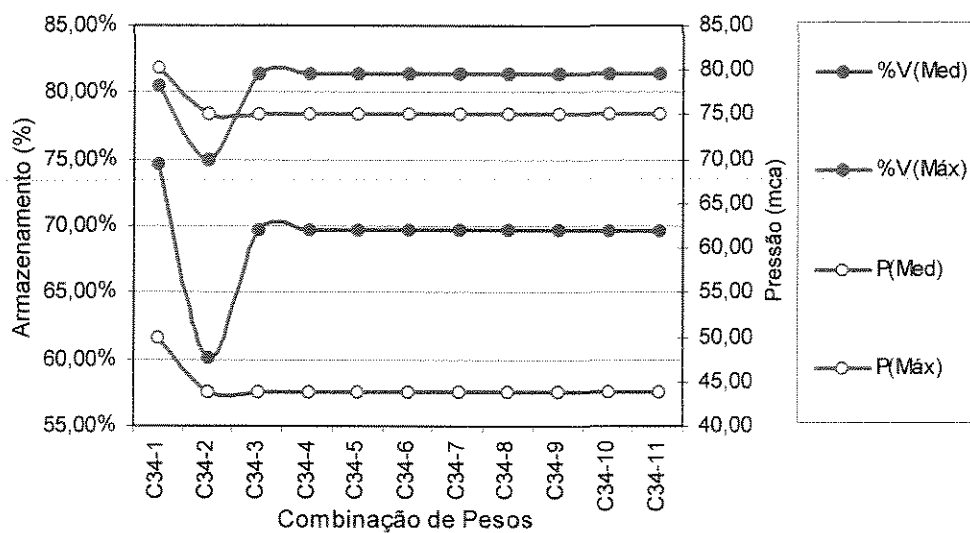


Figura 6.25 – Curvas integradas de soluções das funções objetivo Z_3 e Z_4

6.4.9 Análise multiobjetivo para as funções Z_3 e Z_5 :

A função objetivo Z_3 busca a maximização dos níveis dos reservatórios, já a função Z_5 procura pela minimização da perda de carga nas válvulas:

Tabela 6.13 - Combinações de pesos – Funções Z_3 e Z_5

Combinações de Pesos	Pesos associados a cada função objetivo				
	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	Z_5
	W_1	W_2	W_3	W_4	W_5
C35-1	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0
C35-2	0,0	0,0	0,9	0,0	0,1
C35-3	0,0	0,0	0,8	0,0	0,2
C35-4	0,0	0,0	0,7	0,0	0,3
C35-5	0,0	0,0	0,6	0,0	0,4
C35-6	0,0	0,0	0,5	0,0	0,5
C35-7	0,0	0,0	0,4	0,0	0,6
C35-8	0,0	0,0	0,3	0,0	0,7
C35-9	0,0	0,0	0,2	0,0	0,8
C35-10	0,0	0,0	0,1	0,0	0,9
C35-11	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0

Das Figuras 6.26 e 6.27 pode-se analisar que para grande porcentagem de armazenamento nos reservatórios obtém-se grande perda de carga nas válvulas e vice-versa. Conclui-se da Figura 6.27 que as combinações R35-4 a R35-10 apresentam soluções iguais e que representam o melhor compromisso entre as soluções das duas funções objetivo.

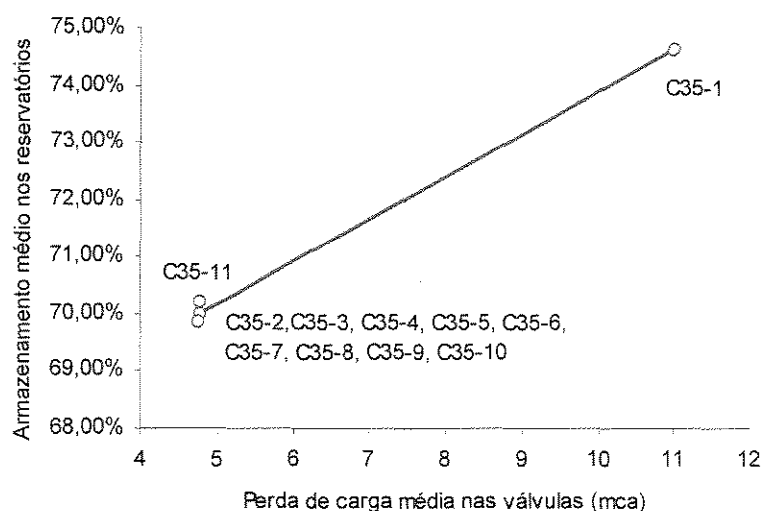


Figura 6.26 – Curva de soluções não-dominadas entre as funções objetivo Z_3 e Z_5 (Valores Médios)

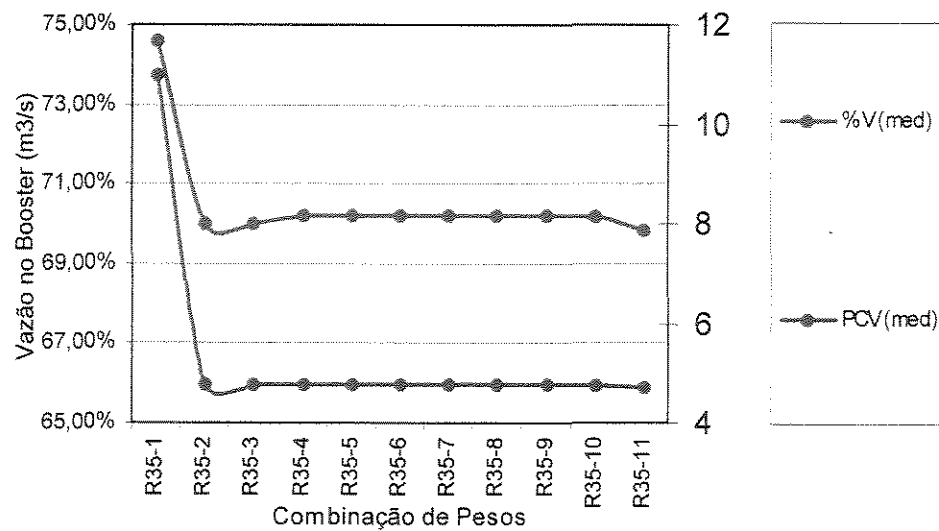


Figura 6.27 – Curvas integradas de soluções das funções objetivo Z_3 e Z_5

6.4.10 Análise multiobjetivo para as funções Z_4 e Z_5 :

A função objetivo Z_4 busca a minimização da pressão nos nós, já a função Z_5 procura pela minimização da perda de carga nas válvulas.

Tabela 6.14 - Combinações de pesos – Funções Z_4 e Z_5

Combinações de Pesos	Pesos associados a cada função objetivo				
	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	Z_5
	w_1	w_2	w_3	w_4	w_5
C45-1	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0
C45-2	0,0	0,0	0,0	0,9	0,1
C45-3	0,0	0,0	0,0	0,8	0,2
C45-4	0,0	0,0	0,0	0,7	0,3
C45-5	0,0	0,0	0,0	0,6	0,4
C45-6	0,0	0,0	0,0	0,5	0,5
C45-7	0,0	0,0	0,0	0,4	0,6
C45-8	0,0	0,0	0,0	0,3	0,7
C45-9	0,0	0,0	0,0	0,2	0,8
C45-10	0,0	0,0	0,0	0,1	0,9
C45-11	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0

Para as combinações que envolviam as funções Z_4 e Z_5 verificou-se que as soluções foram sempre as mesmas, independentes da composição de pesos. Interpretando e analisando os resultados conclui-se que a minimização da pressão nos nós e a minimização da perda de carga nas válvulas são funções concordantes e assim qualquer combinação de pesos leva a um ponto de mínimo comum. Somente encontraríamos diferença nos resultados se as funções ganhassem coeficientes de peso iguais a zero, mas daí estaríamos tirando as duas funções da função multiobjetivo. Na Figura 6.28 representou-se com retas as soluções encontradas para a gama de combinações de pesos.

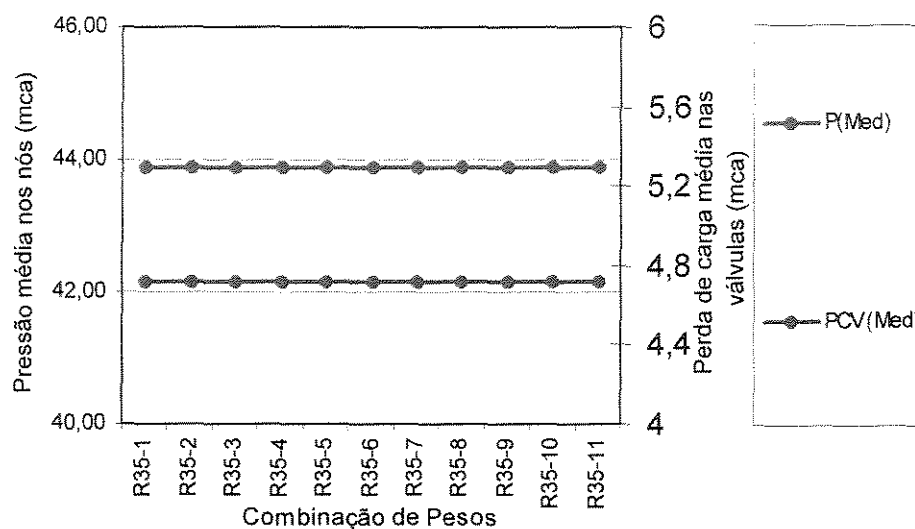


Figura 6.28 – Curvas integradas de soluções das funções objetivo Z_4 e Z_5

6.5 Síntese dos Resultados

Após o traçado das curvas de soluções não dominadas estudou-se uma forma de classificar o grau de compromisso entre as soluções para cada par de funções objetivo. O grau de compromisso entre as soluções fornece uma idéia de quanto um objetivo é sacrificado em benefício de outro.

Para obter um número que fornecesse uma idéia do grau de compromisso entre soluções, utilizou-se uma analogia com o conceito de elasticidade de demanda que é

amplamente utilizado em economia, desenvolveu-se o coeficiente β o qual é apresentado na equação 6.8.

$$\beta_{i,j} = \frac{\partial f_i}{\partial f_j} \times \frac{\overline{f_j}}{\overline{f_i}} \equiv \frac{\Delta f_i}{\Delta f_j} \times \frac{\overline{f_j}}{\overline{f_i}} \dots\dots\dots (6.8)$$

onde:

$\beta_{i,j}$: Coeficiente para classificar o grau de compromisso entre funções i e j ;

f_j : Função objetivo j ;

f_i : Função objetivo i .

Na Figura 6.29, ilustra-se uma curva de soluções não dominadas entre duas funções objetivo e identificam-se regiões específicas com diferentes graus de compromisso entre soluções. A região AB da Figura 6.29 representa uma região de forte compromisso da função objetivo i com a função objetivo j . Na sequência a região BC é de compromisso moderado e a região CD é de fraco compromisso. Se analisarmos relações contrárias, ou seja, da função objetivo j em relação à função objetivo i invertem-se os graus de compromisso de maneira dual.

Na Tabela 6.15, apresentam-se limites de grau de compromisso para a classificação das soluções.

Tabela 6.15 – Classificação de compromissos

Coeficiente β	Grau de compromisso
$\beta \leq 1$	Fraco
$1 < \beta \leq 2$	Moderado
$2 < \beta$	Forte

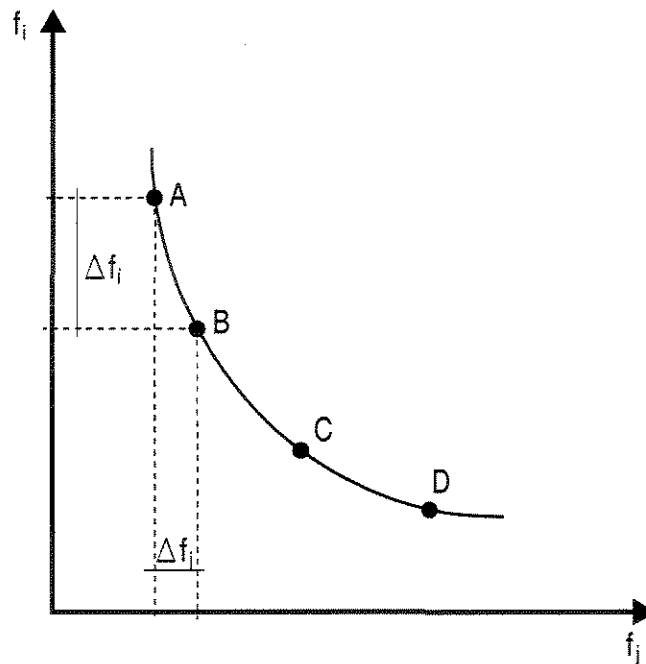


Figura 6.29 – Estudo de grau de compromisso entre funções objetivo

A seguir, apresentam-se, na Tabela 6.16, os valores numéricos dos graus de compromissos e respectivas classificações entre as funções estudadas no trabalho.

Tabela 6.16 – Classificação quanto aos compromissos das soluções

Funções	β	Compromisso
Z_1 e Z_2	2.026	Forte
Z_1 e Z_3	0.633	Fraco
Z_1 e Z_4	3.390	Forte
Z_1 e Z_5	0.330	Fraco
Z_2 e Z_3	0.225	Fraco
Z_2 e Z_4	4.856	Forte
Z_2 e Z_5	0.403	Fraco
Z_3 e Z_4	1.694	Moderado
Z_3 e Z_5	0.082	Fraco
Z_4 e Z_5	Solução única	-----

Para a aplicação da metodologia no dia a dia da operação é preciso que o decisor faça sua opção pela combinação de pesos. Na Tabela 6.17, fazem-se sugestões de combinações de pesos para as empresas de abastecimento visitadas. Essas combinações são sugestões formuladas por meio da percepção adquirida em função das entrevistas realizadas com os decisores dos sistemas.

Tabela 6.17 – Possíveis combinações de pesos

Empresa	Pesos associados às funções objetivos				
	W_1	W_2	W_3	W_4	W_5
SANASA / Campinas	0.0	0.3	0.5	0.1	0.1
SAAE / Cerquilha	0.0	0.2	0.5	0.3	0.0
SABESP / Itatiba	0.0	0.2	0.1	0.7	0.0
Águas de Limeira / Limeira	0.0	0.3	0.2	0.5	0.0
SAMAE / Mogi Guaçu	0.0	0.3	0.5	0.2	0.0
SAAE / Mogi Mirim	0.0	0.3	0.5	0.2	0.0
SABESP / São Paulo	0.3	0.3	0.1	0.2	0.1
DAE / Valinhos	0.0	0.3	0.2	0.5	0.0

7. CONCLUSÕES

Foi proposta nesta tese uma formulação multiobjetivo para o problema do planejamento da operação de um sistema urbano de abastecimento de água. A hipótese subjacente à proposição da investigação empreendida é a de que os sistemas de abastecimento têm sido, na prática, operados sob múltiplos objetivos e que, no entanto, tal aspecto não tem sido devidamente considerado nos modelos computacionais até então desenvolvidos. Assim, o trabalho de pesquisa que se apresenta pretendeu trazer contribuições: a) a uma melhor compreensão sobre os objetivos operacionais considerados relevantes sob a ótica dos gestores de sistemas urbanos de abastecimento de água; b) à tradução de tais objetivos (nem sempre explícitos de forma quantitativa) em funções matemáticas de significado prático e com possibilidade de tratamento computacional; c) à caracterização do grau de compromisso entre as funções objetivo estudadas, feita através de modelo matemático computacional que representou fidedignamente a rede hidráulica e seus componentes, incluindo as principais restrições e condicionantes operacionais.

Com a realização das visitas foi possível identificar nas empresas quais seriam seus principais objetivos administrativos e problemas técnico-operacionais e assim fazer a modelagem destes problemas ou objetivos em termos matemáticos para obter subsídios ao desenvolvimento da metodologia proposta. Objetivos como a redução de oscilação de vazão na ETA, redução de custos com bombeamento, redução de perdas físicas (através da minimização da pressão média nos nós), maximização de armazenamento nos reservatórios e minimização de perdas de energia nas válvulas foram estudados e transformados em codificação matemática e integraram a análise multiobjetivo do problema.

Por meio das entrevistas realizadas nas empresas de abastecimento de água foi possível conhecer a situação tecnológica atual das mesmas, bem como suas organizações. Após as visitas concluiu-se que muitos problemas enfrentados são semelhantes, dos quais podem ser destacados: a) a falta de uma estrutura organizacional que viabilize um fluxo contínuo de informações e uma padronização de procedimentos, b) a falta de conhecimento dos sistemas devido a sistemática precariedade dos dados cadastrais, c) políticas de gestão ineficientes de recursos financeiros, hídricos e humanos e d) dificuldades dos operadores na manipulação dos objetivos operacionais, traduzindo-os através de regras de operação.

Verificou-se que as dificuldades operacionais nos sistemas advêm da carência de técnicas de engenharia de operação de sistemas e também de técnicas modernas sobre gestão de pessoas, principalmente diante das facilidades atuais nos meios de comunicação.

Devido à natureza do problema físico e do grau de complexidade do equacionamento do problema, optou-se por utilizar ferramentas simples, mas não menos eficazes para aplicação ao problema, sendo escolhidas a programação linear como módulo de otimização e o método dos pesos para a abordagem multiobjetivo.

Durante a revisão bibliográfica sobre o tema do trabalho confirmou-se a originalidade e relevância do mesmo, pois existem muitos trabalhos desenvolvidos para a operação de sistemas urbanos de abastecimento de água, porém a abordagem multiobjetivo do problema, juntamente com o grau de detalhamento do problema caracterizava uma lacuna de conhecimento na área, cujo preenchimento se mostrou viável e importante devido à natureza dos objetivos operacionais envolvidos no problema.

Outro avanço no trabalho foi a modelagem de componentes das redes hidráulicas. Elaborou-se um estudo dos principais componentes dos sistemas de

abastecimento de água, descrevendo a função de cada um e preparando-o para a modelagem matemática.

Na modelagem de “boosters” estudou-se o equacionamento com velocidade de rotação variável, fazendo ajustes do ponto de funcionamento através da rotação nominal, possibilitando assim maior flexibilidade operacional ao sistema. Para este trabalho, lançou-se sobre a curva manométrica de uma bomba a relação com a velocidade de rotação, sendo assim possível obter diversos pontos de funcionamento do sistema, cada qual associado a uma rotação.

As válvulas de controle também foram modeladas e analisadas como curvas teóricas de fechamento. No trabalho apresentam-se dois equacionamentos: a) num primeiro caso a modelagem é feita para uma válvula do tipo gaveta encontrada em LEVIN (1968), b) No segundo caso desenvolveu-se no trabalho uma curva genérica baseada na equação de uma circunferência.

No equacionamento das tubulações modelaram-se duas formulações: a) num primeiro caso empregou-se no cálculo da perda de carga a equação de Darcy-Weisback, obtendo o fator de atrito pela expressão de Colebrook-White, garantindo assim precisão no equacionamento, sem a dependência de ábacos ou expressões aproximadas, b) num segundo caso empregou-se a fórmula da Hazen-Williams, na qual emprega-se o coeficiente C para o cálculo da perda de carga. No estudo de caso desta tese, a modelagem dos tubos utilizou a fórmula de Hazen-Williams, pois nos dados físicos da rede havia a disponibilidade de dados do coeficiente C.

Os demais componentes das redes, tubos e reservatórios são os comuns encontrados na literatura. O tratamento das demandas nos nós e nos reservatórios foi abordado de uma maneira determinística, feita com discretização temporal horária, perfazendo um horizonte de planejamento de 24 horas.

Para a aplicação da modelagem de otimização foram necessárias as traduções dos objetivos operacionais dos gestores em termos de códigos matemáticos, definindo-se uma maneira apropriada para cada objetivo. Neste estudo procurou-se formas de satisfazer tais objetivos por meio de manipulação das variáveis controláveis, como no caso da função objetivo que visa a redução de perdas, traduzida através de uma redução da pressão média nos nós.

O problema original de operação de redes hidráulicas tem natureza não linear. No trabalho optou-se pela aplicação do Método da Teoria Linear e assim procedeu-se a linearização do problema lançando mão de recursos iterativos para que fosse possível a implementação de uma rotina de Programação Linear. Durante a fase de desenvolvimento da modelagem utilizou-se dois pacotes de otimização. O primeiro foi o MINOS 5.1, que se mostrou viável para a aplicação de redes de pequeno porte, mas na modelagem do estudo de caso deste trabalho o processo de otimização apresentava infactibilidades que o MINOS não conseguiu resolver. Já a experiência com o GAMS/CONOPT se mostrou viável e assim se justificando mais apropriada. Esta opção se mostrou muito satisfatória uma vez que o problema do estudo de caso, que tem porte expressivo, não apresentou dificuldades de convergência nem de infactibilidades nas soluções.

Para a abordagem multiobjetivo do problema, após a revisão sobre os métodos para otimização multiobjetivo disponíveis, optou-se por um método contínuo capaz de gerar as soluções e que fosse de fácil implementação matemática, como é o caso do Método dos Pesos. O método se mostrou viável e de aplicação muito simples com nível de detalhamento satisfatório para resolver o problema.

Para a análise dos resultados construiu-se curvas de soluções não-dominadas combinando as funções duas a duas, analisando assim os “*Trade-offs*” entre as soluções encontradas, visualizando o quanto uma função ganha em detrimento da outra associada, por meio da análise multiobjetivo. Para quantificar o grau de compromisso entre as soluções criou-se um parâmetro com capacidade de medir o grau de

dependência entre as soluções. Tal parâmetro foi baseado no conceito de elasticidade da demanda, amplamente utilizado em Economia. Também foi construída uma tabela que fornece limites numéricos para a classificação do grau de compromisso entre as funções.

As curvas de soluções não-dominadas nem sempre apresentam formas características típicas como aquelas verificadas nos livros teóricos de análise multiobjetivo, sendo reconhecido em alguns casos, a não ocorrência de funções monotônicas e que, portanto, seus pontos não reproduzem uma curva característica típica. Também ocorreu o caso onde, para um determinado par de funções, a variação de pesos para as funções objetivo não afetou a solução, apresentando solução única ao problema.

Para a aplicação da metodologia desenvolvida verificou-se que a tomada de decisões pode ser estruturada através da combinação de pesos que advêm das preferências do decisor. Assim, elaboraram-se combinações de pesos extraídas da experiência adquirida nas entrevistas com os gestores responsáveis pelos sistemas.

Como sequência à aplicação e desenvolvimento deste trabalho destacam-se alguns pontos a serem estudados: a) a aplicação de um módulo de otimização não-linear, substituindo o módulo de otimização linear iterativo aplicado no trabalho, o qual reduziria drasticamente o número de iterações no modelo; b) o tratamento do problema de maneira estocástica no quesito “demandas nos nós da rede” deixaria a modelagem mais próxima da realidade com o dia-a-dia da operação dos sistemas; c) a implementação de testes conjuntos com modelos de simulação de sistemas convalidaria os resultados do modelo de otimização; d) a busca de novas funções objetivo seria interessante para ampliar o tratamento multiobjetivo apresentado neste trabalho.

Diante dos resultados alcançados, respeitando-se os limites quanto ao escopo e extensão intrínsecas à natureza do trabalho, acredita-se que a pesquisa cumpriu aos seus objetivos originais.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABADIE, J., CARPENTIER, J. **Generalization of the Wolfe Reduced Gradient Method to the case of Nonlinear Constraints**, in: Optimization, R. Fletcher (ed), Academic Press, New York, pp.37-47. 1969.
- AHUJA, R.K., MAGNANTI, T.L., ORLIN, J.B. **Network Flows: Theory, Algorithms, and Applications**. Prentice-Hall, Inc. 846p. New Jersey. 1993.
- ANDRADE FILHO, M. G. **Modelo de otimização para o uso múltiplo da água do Rio São Francisco**. Campinas: FEC, UNICAMP, Dissertação (Mestrado) Faculdade de Engenharia de Campinas, Universidade Estadual de Campinas, 1986.
- ASSY, T.M. **O Emprego da Fórmula Universal de Perda de Carga e as Limitações das Fórmulas Empíricas**. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental – CETESB. São Paulo, 1977.
- AZARM, S. **Multiobjective Optimization: Supplementary Course Notes**. University of Maryland at College Park. 37p. 1996.
- AZEVEDO, L.G.T., PORTO, R.L.L., PORTO, M.F.A. **Sistema de apoio a decisão para o gerenciamento integrado de quantidade e qualidade da água: metodologia e estudo de caso**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, v. 3, n. 1, p. 21-51, jan./mar. 1998.

AZEVEDO NETO, J.M. et ali. **Planejamento de Sistemas de Abastecimento de Água**. Universidade Federal do Paraná. 281p. 1973.

AZEVEDO NETO, J.M. et ali. **Projeto de Sistemas de Distribuição de Água**. Companhia Estadual de Tecnologia de Saneamento Básico e de Controle de Poluição das Águas, CETESB. São Paulo. 336p. 1975.

BARBOSA, P.S.F. **O gerenciamento de recursos hídricos no estado de São Paulo**. Revista de Administração da USP, São Paulo, v. 32, n 1, p. 47-57, jan/mar, 1997a.

BARBOSA, P.S.F. **Modelos de Programação Linear em Recursos Hídricos**. In: PORTO, R.L.L., Técnicas Quantitativas para o Gerenciamento de Recursos Hídricos. Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS. p.97-163. 1997b.

BARBOSA, P.S.F. **O Emprego da Análise Multiobjetivo no Gerenciamento dos Recursos Hídricos Brasileiros**. A Água em Revista - Revista Técnica e Informativa da CPRM, Belo Horizonte, ano 5, n. 8, p. 42-46, março, 1997c.

BOULOS, P.F., ROSSMAN, L.A., ORR, C.H., HEATH, E., MEYER, M.S., **Fire Flow Computation with Network Models**. Journal of American Water Works Association. p. 51-56, V. 89, February. 1997.

BRAGA, B.P.F., BARBOSA, P.S.F., BARROS, M.T.L. **SISCOM: Sistema Computadorizado de Apoio ao Planejamento e Operação de Sistemas Hidroelétricos**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, v. 3, n. 4, p. 89-101, out./dez. 1998.

BRAILEY, D., JACOBS, A. **Energy Management in the Waterworks Industry**, J. N. Engl. Water Works Assoc., 94(3), pp. 216-226. 1980.

- BRION, L.M., MAYS, L.W. **Methodology for Optimal Operation of Pumping Stations in Water Distribution Systems**. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE. v.117, n.11, p.1551-1569. November, 1991.
- BROOKE, A., KENDRIK, D., MEERAUS, A. **GAMS – General Algebraic Modeling System**. The Scientific Press. 279p. Washington, USA, 1988.
- CABRERA, E. **Uso Eficiente del Agua. Directrices Y Herramientas** (Efficient Use Rationale On Water. Guidelines and Tools). EURO water. Valencia, Espanha. Septiembre, 1997.
- CASOTTI, F.A.G. **Um Sistema de Suporte à Decisão Baseado em Programação Multiobjetivo**, Tese (Mestrado). FEE - UNICAMP, Campinas, 1993.
- CASTRO, J.M.S. **Gerenciamento Adequado da Distribuição/Reflexos na Produção**. ABES – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. 20º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. II-071. p. 3581-3592. 1999.
- CLINGENPEEL, W. H. **Optimizing Pump Operating Cost**. Journal of American Water Works Association, 75(10), pp. 502-509. 1983.
- COHON, J.L., MARKS, D.H. **A Review and Evaluation of Multiobjective Programming Techniques**. Water Resources Research. v. 11, n. 2, p. 208-220, April, 1975.
- COHON, J.L. **Multiobjective Programming and Planning**. Academic Press. 333 p. London. 1978.
- COSTA, Z.A.M., MOURA, T.R.S. **Estratégias de Educação para Implantação de um Programa de qualidade da Operação para Gerenciamento da Rotina de Trabalho do Dia-a-Dia em um Sistema de Abastecimento de Água**. ABES –

- Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. 20º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. VII-013. p. 2683-2693. 1999.
- DANTZIG, G. B. **Linear Programming and Extensions**, Princeton University Press, Princeton, New Jersey. 1963.
- FERREIRA, P.A.V., GEROMEL, J.C. **An Interactive Projection Method for Multicriteria Optimization Problems**, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. V. 20, N. 3, 1990.
- GOULTER, I.C. **Multi-objective optimization of water distribution networks**. Civil Engineering System. v.3, p.222-231, December. 1986.
- HAALAND, S. E. **Simple and Explicit Formulas for the Friction Factor in Turbulent Pipe Flow**. Journal of Fluids Engineering (Transactions of ASME). v. 105, p. 89 –90. march, 1983.
- IONEL I.L. **Pumps and Pumping: Studies in Mechanical Engineering**. Elsevier Science Publishing Company. 715p. 1986.
- JARRIGE, P.A. **Optimal Control of Water Distribution networks**. Technical Survey and Practical Applications. In: Water Supply Systems State of the Art and Future Trends, Ed. by E. Cabrera and F. Martinez. Valencia, Spain. p.319-329. 1993.
- JOWITT, P. W., Xu, C. **Optimal Valves Control in Water-Distribution Networks**, Journal of Water Resources Planning and Management, 116(4), pp. 455-472, 1990.
- JOWITT, P. W., GERMANOPOULOS, G. **Optimal Pump Scheduling in Water-Supply Networks**, Journal of Water Resources Planning and Management, 118(4), pp. 406-422, 1992.

- KESSLER, A., SHAMIR, U. **Analysis of the Linear Programming Gradient Method for Optimal Design of Water Supply Networks**. Water Resources Research. v.25, n.7, p.1469-1480, July. 1989.
- KOELLE, E., ANDRADE, J.G., LUVIZOTTO JUNIOR, E., **Projeto e Operação de Sistemas Públicos de Adução e Distribuição de Água**, Apostila do Curso Intensivo de Atualização em Engenharia. UNICAMP, 46p. Campinas, setembro, 1995.
- KOIDE, S. **Equações Simplificadas para a Utilização da Fórmula Universal de Perda de Carga em Tubulações**. Engenharia Sanitária e Ambiental. v.3, n.3, jul/set e n.4, out/dez, 1998.
- LABADIE, J. W. **Program MODSIM, River Basin Network Flow Model for the Microcomputer**, Departament of Civil Engineering, Colorado State University, Fort Collins, Co., 1988.
- LANSEY, K. E., AWUMAH, K. **Optimal Pump operations Considering Pump Switches**, Journal of Water Resources Planning and Management, 120(1), pp. 17-35, 1994.
- LENCASTRE, A., **Handbook of Hydraulic Engineering**, Ellis Horwood Series in CIVIL ENGINEERING, England, 540p, 1987.
- LEVIN. L. **Formulaire des Conduites Forcées Oléoducs et Conduits D'Aération**. Dunop. 116p. Paris. 1968.
- LITTLE, K. W., MCCRODDEN, B. J. **Minimization of Raw Water Pumping Cost Using MILP**, Journal of Water Resources Planning and Management, 115(4), pp. 511-522, 1989.

LUCCA, Y.F.L. **A Utilização de Válvulas em Instalações de Abastecimento de Água**, Palestra do Curso de Pós-Graduação de Engenharia Civil. Faculdade de Engenharia Civil – UNICAMP, Campinas, 1998.

LUVIZOTTO JUNIOR, E. **Controle Operacional de Redes de Abastecimento de Água Auxiliado por Computador**, Tese (Doutorado). EPUSP, São Paulo, 1995.

MACHADO, M.E.S. **Projeção em Programação Multiobjetivo: Análise Algorítmica e Experiências Numéricas**, Dissertação (Mestrado). FEE - UNICAMP, Campinas, 1991.

MACINTYRE, A.J., **Bombas e Instalações de Bombeamento**. Editora Guanabara. Rio de Janeiro, RJ. 782 p. 1987.

MAYS, L.W., TUNG, Y.K. **Hydrosystems Engineering and Management**. Singapore: McGraw-Hill, Chapter 9: Water Distribution Systems. p.354-385. 1992.

MAYS, L.W., **Reliability Analysis of Water Distribution Systems**. ASCE. New York, USA. 532p.1989.

MURTAGH, B.A., SAUNDERS M.A. **Minos 5.1 User's Guide**, Technical Report, 1987.

NITIVATTANANON, V., SADOWSKI, C. E., QUIMPO, R. G. **Optimization of Water Supply System Operation**, Journal of Water Resources Planning and Management, 122(5), pp. 374-384, 1996.

ORMSBEE, L.E., LANSEY, K.E. **Optimal Control of Water Supply Pumping Systems**. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE. v.120, n.2, p.237-252, March/April. 1994.

- ORMSBEE, L.E., REDDY, S.L. **Nonlinear Heuristic For Pump Operations**. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE. p.302-309, July/August. 1995.
- ORMSBEE, L.E., LINGIREDDY, S. **Calibrating Hydraulic Network Models**. Journal of American Water Works Association. p. 42-50, V. 89, February. 1997.
- OSTFELD A., SHAMIR U. **Optimal Operation of Multiquality Networks**. II: Unsteady Conditions. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE. p.663-684, Vol. 119, N. 6. November/December. 1993.
- PARLATORE, A.C. **Privatização do Setor de Saneamento no Brasil**. In: PINHEIRO, A.C., FUKASAKU, K. A Privatização no Brasil – O Caso de Serviços de Utilidade Pública. BNDS, Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior, Governo Federal. Editora do Departamento de Relações Institucionais. Fevereiro, 2000.
- PEZESHK, S., HELWEG, O. J. **Adaptive Search Optimization in Reducing Pump Operating Costs**, Journal of Water Resources Planning and Management, 122(1), pp. 57-63, 1996.
- SANTANA, G.C., SOARES, S. **Optimization Model for Water Distribution Systems Design**. In: FOURTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON HYDRAULIC ENGINEERING SOFTWARE. p. 299-307. 1992.
- SANTANA, G.C. **Otimização da Operação de Sistemas de Distribuição de Água Abastecidos por Bombeamento e Reservatórios de Regularização**. Tese (Doutorado). FEEC - UNICAMP, Campinas, 1999.
- SERFATY, S. **Planos Diretores de Abastecimento d'água - Contribuição à sua Implantação**. A Água em Revista - Revista Técnica e Informativa da CPRM. Belo Horizonte, ano III, n.4, p.40-47. fevereiro, 1995

SIMONOVIC, S.P. **A Systems Approach to Creative Water Resources Engineering**. Curso CTH-USP, São Paulo, Brasil. 1998.

SNIS. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento**. Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 1999. v.5. Brasília, dez. 2000.

SUN, Y.H., YEH, W.W.G., HSU, N.S. **Generalized Network Algorithm for Water-Supply-System Optimization**. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE. v.121, n.5, p.392-398. September/October, 1995.

SZIDAROVSKY, F., GERSHON, M.E., DUCKSTEIN, L., **Techniques for Multiobjective Decision Making in Systems Management**. Elsevier Science Publishing Company Inc. 506p. New York. 1986.

TAHA, H.A. **Operations Research: An Introduction. Fourth Edition**. Macmillan Publishing Company. 876p. New York. 1987.

TARQUIN, A.J., DOWDY, J. **Optimal Pump Operation in Water Distribution**. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE. v.115, n.2, p.158-168. February, 1989.

VENTURINI, M.A.A.G. **Contribuição ao estudo de otimização de redes hidráulicas através de um modelo de programação linear**. Campinas: FEC, UNICAMP, Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, 1997a.

VENTURINI, M.A.A.G., BARBOSA, P.S.F., **Um algoritmo iterativo de programação linear para a otimização da operação de redes hidráulicas malhadas**. XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Vitória, ES, 1997b.

- WALSKI, T.M. **Optimization and Pipe-Sizing Decisions**. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE. p.340-343. July/August, 1995.
- WALSKI, T.M., BRILL, E.D., GESSLER, J., GOULTER, I.C., JEPPSON, R.M., LANSEY, K., LEE, H-L., LIEBMAN, J.C., MAYES, L., MORGAN, D.R., ORMSBEE, L. **Battle of the Network Models: Epilogue**. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE. v.113, n.2, p.191-203. March, 1987.
- WOOD, D.J., CHARLES C., **Hydraulic Network Analysis Linear Theory**, Journal Hydraulic Div., Proc. Amer. Soc. Civil Engineers, v.98, p. 1157-1170, 1972.
- WOOD, D. J., REDDY, L. S. **Control de Bombas de Velocidad Variable y Modelos en Tiempo Real para Minimizar Fugas y Costes Energéticos**, in: Mejora del Rendimiento y de la Fiabilidad en Sistemas de Distribucion de Agua, Editores E. Cabrera, U. D. Mecánica de Fluidos, Universidad Politécnica de Valencia, A. F. Vela e Universitat Jaume I de Castellón, pp. 271-296, 1994.
- ZAHED FILHO, K., **Previsão de Demanda de Consumo em Tempo Real no Desenvolvimento Operacional de Sistemas de Distribuição de Água**. Tese de Doutorado, EPUSP. São Paulo. 135p. 1990.
- ZESSLER, U., SHAMIR, U. **Optimal Operation of Water Distribution Systems**, Journal of Water Resources Planning and Management, 115(6), pp. 735-752, 1989.
- YANG, S., HSU, N.S., LOUIE, P.W.F., YEH, W.W.G. **Water Distribution Network Reliability: Connectivity Analysis**. Journal of Infrastructure Systems, ASCE. v.2, n.2, p.54-64. June,1996.
- YANG, S., HSU, N.S., LOUIE, P.W.F., YEH, W.W.G. **Water Distribution Network Reliability: Stochastic Simulation**. Journal of Infrastructure Systems, ASCE. v.2, n.2, p.65-72. June,1996.

APÊNDICE - A

EXEMPLO DE RESULTADOS PARA UMA COMBINAÇÃO DE PESOS
COMBINAÇÃO DE PESOS C12 – 11

Tabela 1.A1 – Dados referentes à combinação de pesos C12 – 11

T	Q_{ETA}	HMB	N
(h)	(m³/s)	(m)	(rpm)
1	33.843	Desligado	
2	21.995	Desligado	
3	23.050	Desligado	
4	22.352	Desligado	
5	27.560	Desligado	
6	25.746	Desligado	
7	31.205	Desligado	
8	33.000	Desligado	
9	36.726	Desligado	
10	46.000	Desligado	
11	48.145	6.415	756
12	47.000	11.451	990,7
13	42.226	12.103	1004,2
14	38.299	9.795	961,2
15	36.724	6.638	886,6
16	36.301	2.323	768,6
17	36.919	3.458	740,5
18	41.289	Desligado	
19	44.795	Desligado	
20	40.846	Desligado	
21	33.000	Desligado	
22	25.503	Desligado	
23	27.028	Desligado	
24	20.359	Desligado	
Média	34.163	7.455	873

Onde:

HMB: Altura manométrica do ponto de funcionamento do booster no tempo T;

N: Rotação operacional no ponto de funcionamento do Booster no tempo T.

Tabela 2.A1 – Dados referentes à combinação de pesos C12 – 11

T (h)	Níveis dos reservatórios (m)							
	HR(1)	HR(2)	HR(3)	HR(4)	HR(5)	HR(6)	HR(7)	HR(8)
1	828,75	819,30	787,03	785,28	787,27	797,84	798,41	792,80
2	826,97	821,06	787,26	785,53	788,62	796,24	798,85	792,44
3	826,97	821,49	787,56	785,94	788,62	795,14	799,24	792,08
4	826,97	821,49	787,87	786,39	788,62	795,98	798,98	791,74
5	826,97	821,49	788,18	786,85	788,62	796,90	798,75	791,41
6	830,97	821,49	788,51	787,32	788,62	797,74	798,51	791,08
7	830,97	821,49	788,63	787,77	788,62	798,37	798,23	790,72
8	830,97	821,49	788,63	788,13	788,62	798,66	797,87	790,32
9	827,20	821,49	788,63	788,34	788,62	798,57	797,43	789,87
10	826,97	821,49	788,63	788,40	788,62	797,92	796,91	789,39
11	826,97	820,25	788,63	788,34	788,62	795,14	796,31	789,39
12	826,97	819,28	788,63	788,18	788,18	795,14	795,64	789,39
13	826,97	818,98	788,59	787,96	787,60	795,14	795,63	789,39
14	826,97	819,33	788,55	787,75	787,01	795,14	795,63	789,39
15	826,97	819,77	788,52	787,58	786,43	795,14	795,63	789,39
16	826,97	820,09	788,53	787,47	785,87	795,14	795,63	789,39
17	826,97	820,37	788,57	787,44	785,35	795,14	795,63	789,39
18	826,97	819,85	788,63	787,43	785,53	795,14	795,63	789,39
19	826,97	819,78	788,63	787,47	785,66	795,14	795,63	789,39
20	826,97	819,40	788,63	787,52	786,00	795,14	795,63	789,39
21	826,97	819,62	788,63	787,57	786,49	795,14	795,63	789,39
22	828,90	821,02	788,63	787,62	787,10	795,14	795,63	789,39
23	826,97	821,49	788,63	787,67	787,76	795,14	795,63	789,39
24	826,97	820,72	788,63	787,73	788,62	795,14	795,63	789,39
Média	827,63	820,51	788,39	787,40	787,54	796,06	796,78	790,14

Onde:

HR(T): Nível dos reservatórios no tempo T.

Tabela 3.A1 – Dados referentes à combinação de pesos C12 – 11

T (h)	Pressão nos nós (mca)										
	P(1)	P(2)	P(3)	P(5)	P(6)	P(7)	P(8)	P(9)	P(10)	P(11)	P(12)
1	49,16	43,12	11,10	59,93	71,37	48,89	56,94	25,89	58,80	35,90	26,58
2	48,96	44,75	13,70	63,99	75,98	54,05	66,44	36,50	68,30	45,70	36,39
3	48,91	44,87	13,90	64,29	76,29	54,37	66,82	36,88	68,70	47,30	37,91
4	48,94	44,93	14,00	64,39	76,41	54,49	66,95	37,02	68,80	47,40	38,04
5	50,80	46,64	15,70	65,95	77,94	56,01	68,44	38,50	70,30	48,90	39,53
6	52,78	48,63	17,70	68,06	80,01	58,07	70,42	40,48	72,30	50,90	41,51
7	52,49	48,19	17,20	67,71	79,65	57,70	69,96	39,99	71,80	50,40	41,05
8	50,37	45,90	14,90	65,37	77,33	55,37	67,49	37,51	69,40	47,90	38,58
9	48,26	43,65	12,60	63,04	75,02	53,04	65,04	35,03	66,90	45,40	36,07
10	47,46	42,69	11,70	61,72	73,57	51,47	62,49	32,46	64,20	39,20	25,08
11	47,28	41,92	10,60	60,15	71,84	49,56	59,16	29,24	66,60	41,10	26,29
12	47,38	41,59	9,96	59,15	70,68	48,22	56,37	26,47	68,20	37,90	22,69
13	47,76	41,83	10,00	59,16	70,68	48,21	56,30	26,40	68,80	38,40	23,17
14	48,04	42,23	10,40	59,56	71,08	48,63	56,90	27,00	67,10	36,80	21,76
15	48,15	42,52	10,80	60,01	71,56	49,16	57,81	27,91	65,00	35,30	20,60
16	48,18	42,71	11,10	60,44	72,06	49,73	58,95	29,05	62,00	33,20	19,10
17	48,14	42,60	10,90	59,67	71,03	48,41	55,33	25,22	59,70	31,80	18,20
18	47,83	42,25	10,60	59,75	71,21	48,70	56,49	26,41	57,50	30,40	17,17
19	47,56	41,96	10,40	59,43	70,85	48,28	55,59	25,41	56,70	30,00	17,14
20	47,86	42,09	10,30	59,24	70,61	47,97	54,76	24,46	55,90	29,40	16,63
21	49,38	43,33	11,20	59,91	71,20	48,50	54,76	24,37	55,90	29,40	16,63
22	49,71	44,11	12,20	60,74	71,97	49,23	55,16	24,73	56,30	29,80	17,02
23	48,72	43,55	11,90	60,40	71,59	48,79	54,22	23,62	55,50	29,40	16,92
24	49,03	44,48	13,10	63,13	74,87	52,71	63,26	33,29	64,70	40,00	28,16

Onde:

P(T): Pressão disponível nos nós no tempo T.

Tabela 4.A1 – Dados referentes à combinação de pesos C12 – 11

T (h)	Perda de Carga Localizada nas Válvulas (mca)						
	PCV(2)	PCV(3)	PCV(4)	PCV(5)	PCV(6)	PCV(7)	PCV(8)
1	0,00	0,00	0,00	19,10	11,77	3,59	14,76
2	1,58	0,00	0,00	29,75	22,37	14,07	24,92
3	1,63	0,00	0,00	30,14	13,17	19,59	26,79
4	1,71	0,00	0,00	30,28	12,42	19,96	27,25
5	3,36	0,00	0,00	31,76	13,04	21,69	29,08
6	5,36	12,51	0,00	33,73	14,29	23,93	31,41
7	4,92	16,75	0,00	33,23	13,36	23,78	31,32
8	2,57	12,14	0,00	30,73	10,79	21,72	29,28
9	0,26	6,93	0,00	28,24	10,27	19,72	27,22
10	0,00	3,07	0,00	25,65	17,65	14,05	14,74
11	0,00	0,00	0,00	22,74	0,00	16,58	15,70
12	0,00	0,00	0,00	20,48	0,00	9,37	11,97
13	0,00	0,00	0,00	21,00	0,00	9,75	12,45
14	0,00	0,00	0,00	22,18	0,00	8,22	11,09
15	0,00	0,00	0,00	23,66	0,00	7,06	10,06
16	0,00	0,00	0,00	25,34	0,00	5,50	8,77
17	0,00	0,00	0,00	21,54	0,00	4,53	8,06
18	0,00	4,61	0,00	22,60	0,00	3,54	7,18
19	0,00	5,26	0,00	21,30	0,00	3,49	7,25
20	0,00	5,55	0,00	19,86	0,00	3,03	6,78
21	0,00	6,21	0,00	19,16	0,00	3,03	6,78
22	0,07	7,04	0,00	18,85	0,00	3,42	7,17
23	0,00	7,17	0,00	16,88	0,31	3,29	7,16
24	1,20	13,05	0,00	26,53	13,64	14,62	18,66

Onde:

PCV(T): Perda de carga localizada nas válvulas no tempo T.

Tabela 5.A1 – Dados referentes à combinação de pesos C12 – 11

T (h)	Vazão nos trechos (m ³ /s)									
	QT(1)	QT(2)	QT(3)	QT(4)	QT(7)	QT(8)	QT(11)	QT(12)	QT(15)	QT(16)
1	34.814	7.814	6.814	1.278	5.535	0,982	4.553	2.412	2.141	2.141
2	21.995	5.655	5.045	0,620	4.425	1.050	3.375	2.597	0,779	0,779
3	23.050	5.420	4.770	0,380	4.390	1.049	3.340	2.592	0,749	0,749
4	22.352	5.372	4.742	0,380	4.362	1.046	3.316	2.578	0,739	0,739
5	25.378	5.588	4.858	0,410	4.448	1.067	3.381	2.622	0,759	0,759
6	25.746	5.576	4.826	0,470	4.356	0,870	3.487	2.688	0,799	0,799
7	31.205	5.775	4.835	0,560	4.275	0,770	3.505	2.657	0,849	0,849
8	35.057	6.007	4.927	0,650	4.277	0,820	3.457	2.548	0,909	0,909
9	36.851	6.181	5.041	0,750	4.291	0,880	3.411	2.443	0,969	0,969
10	46.000	6.390	4.920	0,272	4.648	0,930	3.718	2.378	1.340	1.340
11	48.145	6.975	5.455	0,453	5.002	0,960	4.042	2.306	1.735	1.735
12	47.000	7.550	6.090	0,778	5.312	0,940	4.373	2.259	2.114	2.114
13	42.226	7.696	6.416	1.076	5.340	0,941	4.399	2.269	2.130	2.130
14	38.299	7.569	6.429	1.093	5.336	0,949	4.387	2.297	2.090	2.090
15	36.724	7.374	6.284	1.001	5.283	0,958	4.325	2.325	2.000	2.000
16	36.301	7.191	6.111	0,935	5.177	0,966	4.211	2.351	1.860	1.860
17	36.919	7.269	6.169	0,532	5.637	0,950	4.687	2.305	2.382	2.382
18	41.289	7.319	6.059	0,689	5.370	0,860	4.510	2.312	2.198	2.198
19	44.795	7.345	5.955	0,522	5.433	0,840	4.593	2.293	2.300	2.300
20	40.846	7.526	6.296	0,777	5.520	0,830	4.690	2.280	2.410	2.410
21	31.949	7.839	6.949	1.299	5.650	0,830	4.820	2.305	2.515	2.515
22	26.556	7.336	6.626	0,878	5.748	0,830	4.918	2.338	2.579	2.579
23	27.028	6.858	6.108	0,298	5.811	0,820	4.991	2.319	2.672	2.672
24	20.359	6.099	5.569	0,870	4.698	0,750	3.948	2.458	1.490	1.490

Onde:

QT(T): Vazão nos trechos na hora T.

Tabela 6.A1 – Dados referentes à combinação de pesos C12 – 11

J (h)	Vazão nos trechos (m ³ /s)								
	QT(17)	QT(18)	QT(21)	QT(22)	QT(24)	QT(27)	QT(28)	QT(31)	QT(32)
1	1.632	1.632	0,509	0,509	0,010	0,499	0,489	0,010	0,010
2	0,270	0,270	0,509	0,509	0,069	0,440	0,430	0,010	0,010
3	0,240	0,240	0,509	0,509	0,489	0,020	0,010	0,010	0,010
4	0,230	0,230	0,509	0,509	0,489	0,020	0,010	0,010	0,010
5	0,250	0,250	0,509	0,509	0,489	0,020	0,010	0,010	0,010
6	0,290	0,290	0,509	0,509	0,489	0,020	0,010	0,010	0,010
7	0,340	0,340	0,509	0,509	0,489	0,020	0,010	0,010	0,010
8	0,400	0,400	0,509	0,509	0,489	0,020	0,010	0,010	0,010
9	0,460	0,460	0,509	0,509	0,446	0,063	0,010	0,053	0,053
10	0,510	0,510	0,830	0,830	0,020	0,810	0,010	0,800	0,800
11	0,125	0,125	1.610	1.610	0,740	0,870	0,010	0,860	0,860
12	0,010	0,010	2.104	2.104	0,770	1.334	0,444	0,890	0,890
13	0,010	0,010	2.120	2.120	0,780	1.340	0,450	0,890	0,890
14	0,010	0,010	2.080	2.080	0,750	1.330	0,450	0,880	0,880
15	0,010	0,010	1.990	1.990	0,710	1.280	0,430	0,850	0,850
16	0,010	0,010	1.850	1.850	0,650	1.200	0,400	0,800	0,800
17	0,662	0,662	1.720	1.720	0,600	1.120	0,370	0,750	0,750
18	0,598	0,598	1.600	1.600	0,550	1.050	0,340	0,710	0,710
19	0,770	0,770	1.530	1.530	0,530	1.000	0,320	0,680	0,680
20	0,920	0,920	1.490	1.490	0,510	0,980	0,310	0,670	0,670
21	1.025	1.025	1.490	1.490	0,510	0,980	0,310	0,670	0,670
22	1.079	1.079	1.500	1.500	0,520	0,980	0,310	0,670	0,670
23	1.252	1.252	1.420	1.420	0,490	0,930	0,290	0,640	0,640
24	0,340	0,340	1.150	1.150	0,370	0,780	0,220	0,560	0,560

Tabela 7.A1 – Resultados referentes à combinação de pesos C12 – 11

J (h)	Abertura das Válvulas (%)						
	PAV(2)	PAV(3)	PAV(4)	PAV(5)	PAV(6)	PAV(7)	PAV(8)
1	100,00	100,00	100,00	99,54	58,75	99,31	36,02
2	99,19	100,00	100,00	96,54	91,58	98,46	20,70
3	98,66	100,00	100,00	96,08	99,09	27,89	18,53
4	98,63	100,00	100,00	95,90	99,11	27,33	18,01
5	98,22	100,00	100,00	96,13	99,09	24,85	16,09
6	98,04	99,50	100,00	96,57	99,05	21,91	13,83
7	98,42	99,35	100,00	97,09	99,08	22,10	13,91
8	99,02	99,48	100,00	97,62	99,17	24,81	15,88
9	99,73	99,63	100,00	98,02	99,12	27,69	82,63
10	100,00	99,77	100,00	98,30	74,38	37,38	99,15
11	100,00	100,00	100,00	93,46	100,00	32,73	99,18
12	100,00	100,00	100,00	28,46	100,00	98,78	99,31
13	100,00	100,00	100,00	27,73	100,00	98,77	99,30
14	100,00	100,00	100,00	26,10	100,00	98,87	99,33
15	100,00	100,00	100,00	24,17	100,00	98,91	99,34
16	100,00	100,00	100,00	22,12	100,00	98,96	99,34
17	100,00	100,00	100,00	98,80	100,00	98,98	99,33
18	100,00	99,69	100,00	98,64	100,00	99,02	99,33
19	100,00	99,66	100,00	98,97	100,00	98,97	99,30
20	100,00	99,65	100,00	99,17	100,00	99,01	99,31
21	100,00	99,63	100,00	99,27	100,00	99,01	99,31
22	99,88	99,61	100,00	99,31	100,00	98,94	99,29
23	100,00	99,60	100,00	99,44	99,86	98,89	99,26
24	99,50	99,41	100,00	97,40	98,77	96,92	98,63

Onde:

PAV(T): Porcentagem de abertura das válvulas no tempo T.

APÊNDICE - B

**MODELAGEM DESENVOLVIDA
ROTINAS COMPUTACIONAIS EM LINGUAGEM FORTRAN
MÓDULO DE OTIMIZAÇÃO - GAMS / CONOPT**


```
C RESULT2='C:\OLIMO\RESULT2.DAT'
OPEN(UNIT=26,FILE=RESULT2,STATUS='OLD')
RESULT3='C:\OLIMO\RESULT3.DAT'
OPEN(UNIT=27,FILE=RESULT3,STATUS='OLD')
RESULT4='C:\OLIMO\RESULT4.DAT'
OPEN(UNIT=28,FILE=RESULT4,STATUS='OLD')
RESULT5='C:\OLIMO\RESULT5.DAT'
OPEN(UNIT=29,FILE=RESULT5,STATUS='OLD')
RESULT6='C:\OLIMO\RESULT6.DAT'
OPEN(UNIT=38,FILE=RESULT6,STATUS='OLD')
C
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
C LEITURA DE CONSTANTES E PARÂMETROS
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
C
CALL LEITOR
PMIN=0
PMAx=100
QM=33
QA1=33
COA=41
ClA=-9.392
C2A=-3.722
QT21=1
HMB=10
NN=900
KI2=1
QV2=1
TOL=0.005
PI=3.1415927
C
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
C FATORES DE DEMANDA
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
C
FATDEM(1)=1.000
FATDEM(2)=0.605
FATDEM(3)=0.653
FATDEM(4)=0.629
FATDEM(5)=0.733
FATDEM(6)=0.747
FATDEM(7)=0.942
FATDEM(8)=1.076
FATDEM(9)=1.136
FATDEM(10)=1.467
FATDEM(11)=1.525
FATDEM(12)=1.461
FATDEM(13)=1.279
FATDEM(14)=1.138
FATDEM(15)=1.087
FATDEM(16)=1.078
FATDEM(17)=1.098
FATDEM(18)=1.258
FATDEM(19)=1.387
FATDEM(20)=1.234
FATDEM(21)=0.893
FATDEM(22)=0.712
```

```

      FATDEM(23)=0.747
      FATDEM(24)=0.528
C
C
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
C   INICIALIZAÇÃO DE FATORES DE PERDA DE CARGA PARA O
C   PROCESSAMENTO ITERATIVO
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
C
      FPC(1)=0.1
      FPC(2)=0.1
      FPC(3)=0.1
      FPC(4)=0.1
      FPC(7)=0.1
      FPC(8)=0.1
      FPC(11)=0.1
      FPC(12)=0.1
      FPC(15)=0.1
      FPC(16)=0.1
      FPC(17)=0.1
      FPC(18)=0.1
      FPC(21)=0.1
      FPC(22)=0.1
      FPC(24)=0.1
      FPC(27)=0.1
      FPC(28)=0.1
      FPC(31)=0.1
      FPC(32)=0.1
C
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
C   LEITURA DE DADOS FÍSICOS
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
C
      RESERV='C:\OLIMO\RESERV.DAT'
      OPEN(UNIT=03,FILE=RESERV,STATUS='OLD')
      READ(3,*)
      READ(3,14)NR
14      FORMAT(20X,I3)
      READ(3,*)
      DO 102 I=1,NR
      READ(3,15)X4(I),X5(I),X6(I),X7(I)
15      FORMAT(10X,F6.2,4X,F6.2,4X,F6.2,4X,F6.2)
      XNRI(I)=X4(I)
      XNRMIN(I)=X5(I)
      XNRMAX(I)=X6(I)
      FAT(I)=3600/((PI*X7(I)*X7(I))/4)
102     CONTINUE
      CLOSE(UNIT=3)
C
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
C   LEITURA DE DADOS DE DEMANDA AOS RESERVATÓRIOS
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
C
      DEMRES='C:\OLIMO\DEMRES.DAT'
      OPEN(UNIT=9,FILE=DEMRES,STATUS='OLD')
      READ(9,*)
      DO 2102 I=1,24

```

[illegible]

```
C      PARÂMETROS DA CURVA DO BOOSTER
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
C
      K1=-(C1A*NN)/(2*C0A)
      K2=(NN/(2*C0A))
      K3=SQRT((C1A*C1A)-(4*C0A*C2A)+((4*C0A*HMB)/(QT21*QT21)))
      K4=K2*K3
      K5=K1+K4
C
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
C      DADOS DE ENTRADA PARA A OTIMIZAÇÃO NO GAMS/CONOPT
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
C
      DARESAB='C:\GAMS386\DARESAB.GMS'
      OPEN(UNIT=2,FILE=DARESAB,STATUS='OLD')
C
      WRITE(2,1000)
1000 FORMAT('VARIABLES')
      WRITE(2,1001)
1001 FORMAT(4X,'QT1 , QT2 , QT3 , QT4 , QT7 , QT8 , QT11 , QT12 , ')
      WRITE(2,1002)
1002 FORMAT(4X,'QT15 , QT16 , QT17 , QT18 , QT21 , QT22 , ')
      WRITE(2,1003)
1003 FORMAT(4X,'QT24 , QT27 , QT28 , QT31 , QT32 , NRF1 , NRF2 , ')
      WRITE(2,1004)
1004 FORMAT(4X,'NRF3 , NRF4 , NRF5 , NRF6 , NRF7 , NRF8 , P1 , P2 , ')
      WRITE(2,1005)
1005 FORMAT(4X,'P3 , P5 , P6 , P7 , P8 , P9 , P10 , P11 , P12 , ')
      WRITE(2,1006)
1006 FORMAT(4X,'PCV2 , PCV3 , PCV4 , PCV5 , PCV6 , PCV7 , PCV8 , ')
      WRITE(2,1906)
1906 FORMAT(4X,'QM , QLO , QUP , HMB , N , YB , YE , Z')
      WRITE(2,1007)
1007 FORMAT('POSITIVE VARIABLES')
      WRITE(2,1008)
1008 FORMAT(4X,'QT1 , QT2 , QT3 , QT4 , QT7 , QT8 , QT11 , QT12 , ')
      WRITE(2,1009)
1009 FORMAT(4X,'QT15 , QT16 , QT17 , QT18 , QT21 , QT22 , ')
      WRITE(2,1010)
1010 FORMAT(4X,'QT24 , QT27 , QT28 , QT31 , QT32 , NRF1 , NRF2 , ')
      WRITE(2,1011)
1011 FORMAT(4X,'NRF3 , NRF4 , NRF5 , NRF6 , NRF7 , NRF8 , P1 , P2 , ')
      WRITE(2,1012)
1012 FORMAT(4X,'P3 , P5 , P6 , P7 , P8 , P9 , P10 , P11 , P12 , ')
      WRITE(2,1013)
1013 FORMAT(4X,'PCV2 , PCV3 , PCV4 , PCV5 , PCV6 , PCV7 , PCV8 , ')
      WRITE(2,1913)
1913 FORMAT(4X,'QM , QLO , QUP , HMB , N;')
      WRITE(2,1014)XNRMIN(1)
1014 FORMAT('NRF1.LO = ',F6.2,',')
      WRITE(2,1015)XNRMAX(1)
1015 FORMAT('NRF1.UP = ',F6.2,',')
      WRITE(2,1016)XNRMIN(2)
1016 FORMAT('NRF2.LO = ',F6.2,',')
      WRITE(2,1017)XNRMAX(2)
1017 FORMAT('NRF2.UP = ',F6.2,',')
```

```

        WRITE(2,1018)XNRMIN(3)
1018  FORMAT('NRF3.LO = ',F6.2,')
        WRITE(2,1019)XNRMAX(3)
1019  FORMAT('NRF3.UP = ',F6.2,')
        WRITE(2,1020)XNRMIN(4)
1020  FORMAT('NRF4.LO = ',F6.2,')
        WRITE(2,1021)XNRMAX(4)
1021  FORMAT('NRF4.UP = ',F6.2,')
        WRITE(2,1022)XNRMIN(5)
1022  FORMAT('NRF5.LO = ',F6.2,')
        WRITE(2,1023)XNRMAX(5)
1023  FORMAT('NRF5.UP = ',F6.2,')
        WRITE(2,1024)XNRMIN(6)
1024  FORMAT('NRF6.LO = ',F6.2,')
        WRITE(2,1025)XNRMAX(6)
1025  FORMAT('NRF6.UP = ',F6.2,')
        WRITE(2,1026)XNRMIN(7)
1026  FORMAT('NRF7.LO = ',F6.2,')
        WRITE(2,1027)XNRMAX(7)
1027  FORMAT('NRF7.UP = ',F6.2,')
        WRITE(2,1028)XNRMIN(8)
1028  FORMAT('NRF8.LO = ',F6.2,')
        WRITE(2,1029)XNRMAX(8)
1029  FORMAT('NRF8.UP = ',F6.2,')
        WRITE(2,7000)
7000  FORMAT('QT1.LO = 0.01;')
        WRITE(2,7001)
7001  FORMAT('QT1.UP = 57.694;')
        WRITE(2,7002)
7002  FORMAT('QT2.LO = 0.01;')
        WRITE(2,7003)
7003  FORMAT('QT2.UP = 12.990;')
        WRITE(2,7004)
7004  FORMAT('QT3.LO = 0.01;')
        WRITE(2,7005)
7005  FORMAT('QT3.UP = 12.990;')
        WRITE(2,7006)
7006  FORMAT('QT4.LO = 0.01;')
        WRITE(2,7007)
7007  FORMAT('QT4.UP = 100;')
        WRITE(2,7008)
7008  FORMAT('QT7.LO = 0.01;')
        WRITE(2,7009)
7009  FORMAT('QT7.UP = 100;')
        WRITE(2,7010)
7010  FORMAT('QT8.LO = 0.01;')
        WRITE(2,7011)
7011  FORMAT('QT8.UP = 100;')
        WRITE(2,7012)
7012  FORMAT('QT11.LO = 0.01;')
        WRITE(2,7013)
7013  FORMAT('QT11.UP = 100;')
        WRITE(2,7014)
7014  FORMAT('QT12.LO = 0.01;')
        WRITE(2,7015)
7015  FORMAT('QT12.UP = 100;')
        WRITE(2,7016)

```

```
7016 FORMAT('QT15.LO = 0.01;')
      WRITE(2,7017)
7017 FORMAT('QT15.UP = 100;')
      WRITE(2,7018)
7018 FORMAT('QT16.LO = 0.01;')
      WRITE(2,7019)
7019 FORMAT('QT16.UP = 100;')
      WRITE(2,7020)
7020 FORMAT('QT17.LO = 0.01;')
      WRITE(2,7021)
7021 FORMAT('QT17.UP = 100;')
      WRITE(2,7022)
7022 FORMAT('QT18.LO = 0.01;')
      WRITE(2,7023)
7023 FORMAT('QT18.UP = 100;')
      WRITE(2,7024)
7024 FORMAT('QT21.LO = 0.01;')
      WRITE(2,7025)
7025 FORMAT('QT21.UP = 100;')
      WRITE(2,7026)
7026 FORMAT('QT22.LO = 0.01;')
      WRITE(2,7027)
7027 FORMAT('QT22.UP = 100;')
      WRITE(2,7929)
7929 FORMAT('QT24.LO = 0.01;')
      WRITE(2,7029)
7029 FORMAT('QT24.UP = 100;')
      WRITE(2,7030)
7030 FORMAT('QT27.LO = 0.01;')
      WRITE(2,7031)
7031 FORMAT('QT27.UP = 100;')
      WRITE(2,7032)
7032 FORMAT('QT28.LO = 0.01;')
      WRITE(2,7033)
7033 FORMAT('QT28.UP = 100;')
      WRITE(2,7034)
7034 FORMAT('QT31.LO = 0.01;')
      WRITE(2,7035)
7035 FORMAT('QT31.UP = 100;')
      WRITE(2,7036)
7036 FORMAT('QT32.LO = 0.01;')
      WRITE(2,7037)
7037 FORMAT('QT32.UP = 100;')
      WRITE(2,7038)
7038 FORMAT('N.LO = 200;')
      WRITE(2,7039)
7039 FORMAT('N.UP = 1500;')
      WRITE(2,5038)
5038 FORMAT('PCV2.LO = 0;')
      WRITE(2,5039)
5039 FORMAT('PCV2.UP = 200;')
      WRITE(2,5040)
5040 FORMAT('PCV3.LO = 0;')
      WRITE(2,5041)
5041 FORMAT('PCV3.UP = 200;')
      WRITE(2,5042)
5042 FORMAT('PCV4.LO = 0;')
```

```

        WRITE(2,5043)
5043 FORMAT('PCV4.UP = 200;')
        WRITE(2,5044)
5044 FORMAT('PCV5.LO = 0;')
        WRITE(2,5045)
5045 FORMAT('PCV5.UP = 200;')
        WRITE(2,5046)
5046 FORMAT('PCV6.LO = 0;')
        WRITE(2,5047)
5047 FORMAT('PCV6.UP = 200;')
        WRITE(2,5048)
5048 FORMAT('PCV7.LO = 0;')
        WRITE(2,5049)
5049 FORMAT('PCV7.UP = 200;')
        WRITE(2,5050)
5050 FORMAT('PCV8.LO = 0;')
        WRITE(2,5051)
5051 FORMAT('PCV8.UP = 200;')
        WRITE(2,1030)
1030 FORMAT('EQUATIONS')
        WRITE(2,1031)
1031 FORMAT(4X,'R1 , R2 , R3 , R4 , R5 , R6 , R7 , R8 , R9 , R10 ,')
        WRITE(2,1032)
1032 FORMAT(4X,'R11 , R12 , R13 , R14 , R15 , R16 , R17 , R18 , R45 ,')
        WRITE(2,1033)
1033 FORMAT(4X,'R19 , R20 , R21 , R22 , R23 , R24 , R25 , R26 , R44 ,')
        WRITE(2,1034)
1034 FORMAT(4X,'R27 , R28 , R29 , R30 , R31 , R32 , R34 , R42 , R43 ,')
        WRITE(2,1035)
1035 FORMAT(4X,'R35 , R36 , R37 , R38 , R39 , R40 , R41 , R46 , LUCRO;')
        WRITE(2,1036)QD1
1036 FORMAT('R1..      1*QT1 - 1*QT2 =E= ',F5.2,',';')
        WRITE(2,1037)QD2
1037 FORMAT('R2..      1*QT2 - 1*QT3 =E= ',F5.2,',';')
        WRITE(2,1038)
1038 FORMAT('R3..      1*QT3 - 1*QT4 - 1*QT7 =E= 0;')
        WRITE(2,1039)
1039 FORMAT('R4..      1*QT7 - 1*QT8 - 1*QT11 =E= 0;')
        WRITE(2,1040)
1040 FORMAT('R5..      1*QT11 - 1*QT12 - 1*QT15 =E= 0;')
        WRITE(2,1041)
1041 FORMAT('R6..      1*QT15 - 1*QT16 =E= 0;')
        WRITE(2,1042)
1042 FORMAT('R7..      1*QT16 - 1*QT17 - 1*QT21 =E= 0;')
        WRITE(2,1043)
1043 FORMAT('R8..      1*QT17 - 1*QT18 =E= 0;')
        WRITE(2,1044)
1044 FORMAT('R9..      1*QT22 - 1*QT24 - 1*QT27 =E= 0;')
        WRITE(2,1045)
1045 FORMAT('R10..     1*QT27 - 1*QT28 - 1*QT31 =E= 0;')
        WRITE(2,1046)
1046 FORMAT('R11..     1*QT31 - 1*QT32 =E= 0;')
        WRITE(2,1047)FAT(1),XNRI(1)
1047 FORMAT('R12..     ',F6.4,'*QT1 - 1*NRF1 + 1.8335*QM =E= -',
1F6.2,',';')
        WRITE(2,1048)FAT(2),XNRI(2),QDR2,FAT(2)
1048 FORMAT('R13..     ',F6.4,'*QT4 - 1*NRF2 =E= - ',F6.2,')

```

```

1+ ',F5.2,'*',F6.4,';')
WRITE(2,1049)FAT(3),XNRI(3),QDR3,FAT(3)
1049 FORMAT('R14.. ',F6.4,'*QT8 - 1*NRF3 =E= - ',F6.2,'
1+ ',F5.2,'*',F6.4,';')
WRITE(2,1050)FAT(4),XNRI(4),QDR4,FAT(4)
1050 FORMAT('R15.. ',F6.4,'*QT12 - 1*NRF4 =E= - ',F6.2,'
1+ ',F5.2,'*',F6.4,';')
WRITE(2,1051)FAT(5),XNRI(5),QDR5,FAT(5)
1051 FORMAT('R16.. ',F6.4,'*QT18 - 1*NRF5 =E= - ',F6.2,'
1+ ',F5.2,'*',F6.4,';')
WRITE(2,1052)FAT(6),XNRI(6),QDR6,FAT(6)
1052 FORMAT('R17.. ',F6.4,'*QT24 - 1*NRF6 =E= - ',F6.2,'
1+ ',F5.2,'*',F6.4,';')
WRITE(2,1053)FAT(7),XNRI(7),QDR7,FAT(7)
1053 FORMAT('R18.. ',F6.4,'*QT28 - 1*NRF7 =E= - ',F6.2,'
1+ ',F5.2,'*',F6.4,';')
WRITE(2,1054)FAT(8),XNRI(8),QDR8,FAT(8)
1054 FORMAT('R19.. ',F6.4,'*QT32 - 1*NRF8 =E= - ',F6.2,'
1+ ',F5.2,'*',F6.4,';')
WRITE(2,1055)FPC(1),XNRI(1),CG(1)
1055 FORMAT('R20.. 0.5*NRF1 - ',F7.4,'*QT1 - 1*P1 =E= -0.5*',F6.2,
1+ ',F6.2,';')
WRITE(2,1056)FPC(2),CG(2),CG(1)
1056 FORMAT('R21.. 1*P1 - 1*P2 - ',F7.4,'*QT2 =E= ',F6.2,'
1- ',F6.2,';')
WRITE(2,1057)FPC(3),CG(3),CG(2)
1057 FORMAT('R22.. 1*P2 - 1*P3 - ',F7.4,'*QT3 =E= ',F6.2,'
1- ',F6.2,';')
WRITE(2,1058)FPC(4),XNRI(2),CG(3)
1058 FORMAT('R23.. -0.5*NRF2 + 1*P3 - ',F7.4,'*QT4 - 1*PCV2 =E=
1 0.5*',F6.2,'- ',F6.2,';')
WRITE(2,1059)FPC(7),CG(5),CG(3)
1059 FORMAT('R24.. 1*P3 - 1*P5 - ',F7.4,'*QT7 =E= ',F6.2,'
1- ',F6.2,';')
WRITE(2,1060)FPC(8),XNRI(3),CG(5)
1060 FORMAT('R25.. -0.5*NRF3 + 1*P5 - ',F7.4,'*QT8 - 1*PCV3 =E=
1 0.5*',F6.2,'- ',F6.2,';')
WRITE(2,1061)FPC(11),CG(6),CG(5)
1061 FORMAT('R26.. 1*P5 - 1*P6 - ',F7.4,'*QT11 =E= ',F6.2,'
1- ',F6.2,';')
WRITE(2,1062)FPC(12),XNRI(4),CG(6)
1062 FORMAT('R27.. -0.5*NRF4 + 1*P6 - ',F7.4,'*QT12 - 1*PCV4 =E=
1 0.5*',F6.2,'- ',F6.2,';')
WRITE(2,1063)FPC(15),CG(7),CG(6)
1063 FORMAT('R28.. 1*P6 - 1*P7 - ',F7.4,'*QT15 =E= ',F6.2,'
1- ',F6.2,';')
WRITE(2,1064)FPC(16),CG(8),CG(7)
1064 FORMAT('R29.. 1*P7 - 1*P8 - ',F7.4,'*QT16 =E= ',F6.2,'
1- ',F6.2,';')
WRITE(2,1065)FPC(17),CG(9),CG(8)
1065 FORMAT('R30.. 1*P8 - 1*P9 - ',F7.4,'*QT17 =E= ',F6.2,'
1- ',F6.2,';')
WRITE(2,1066)FPC(18),XNRI(5),CG(9)
1066 FORMAT('R31.. -0.5*NRF5 + 1*P9 - ',F7.4,'*QT18 - 1*PCV5 =E=
1 0.5*',F6.2,'- ',F6.2,';')
WRITE(2,1067)FPC(21),FPC(22),CG(10),CG(8)
1067 FORMAT('R32.. 1*P8 - 1*P10 - ',F7.4,'*QT21 - ',F7.4,'*QT22 =E=

```

```

1-1*HMB + ',F6.2,-',F6.2,',';')
WRITE(2,1069)FPC(24),XNRI(6),CG(10)
1069 FORMAT('R34.. -0.5*NRF6 + 1*P10 - ',F7.4,'*QT24 - 1*PCV6
1 =E= 0.5*',F6.2,-',F6.2,',';')
WRITE(2,1070)FPC(27),CG(11),CG(10)
1070 FORMAT('R35.. 1*P10 - 1*P11 - ',F7.4,'*QT27 =E=
1 ',F6.2,-',F6.2,',';')
WRITE(2,1071)FPC(28),XNRI(7),CG(11)
1071 FORMAT('R36.. -0.5*NRF7 + 1*P11 - ',F7.4,'*QT28 - 1*PCV7
1 =E= 0.5*',F6.2,-',F6.2,',';')
WRITE(2,1072)FPC(31),CG(12),CG(11)
1072 FORMAT('R37.. 1*P11 - 1*P12 - ',F7.4,'*QT31 =E=
1 ',F6.2,-',F6.2,',';')
WRITE(2,1073)FPC(32),XNRI(8),CG(12)
1073 FORMAT('R38.. -0.5*NRF8 + 1*P12 - ',F10.4,'*QT32 - 1*PCV8
1 =E= 0.5*',F6.2,-',F6.2,',';')
WRITE(2,1074)
1074 FORMAT('R39.. 1*QT21 - 1*QT22 =E= 0; ')
WRITE(2,1874)
1874 FORMAT('R40.. 1*QM + 1*QLO -1*QUP =E= 33; ')
WRITE(2,3875)K5
3875 FORMAT('R41.. ',F11.5,'*QT21 - 1*N =E= 0; ')
C
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
C VARIÁVEIS AUXÍLIARES PARA PROGRAMACAO MULTIOBJETIVO
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
C
WRITE(2,1879)
1879 FORMAT('R42.. 0.77 * QT21 =E= YB; ')
WRITE(2,1880)
1880 FORMAT('R43.. 0.18 * QUP + 0.18 * QLO =E= YE; ')
WRITE(2,2111)
2111 FORMAT('R44.. 0.00015 * NRF1 + 0.00015 * NRF2 + 0.00015 * NRF3
1 + 0.00015 * NRF4 + 0.00015 * NRF5 + 0.00015 * NRF6 +
2 0.00015 * NRF7 + 0.00015 * NRF8 =E= YR; ')
WRITE(2,2112)
2112 FORMAT('R45.. 0.002 * P1 + 0.002 * P2 + 0.002 * P3
1 + 0.002 * P5 + 0.002 * P6 + 0.002 * P8 + 0.002 * P9
2 + 0.002 * P10 + 0.002 * P11 + 0.002 * P12 =E= YP; ')
WRITE(2,2992)
2992 FORMAT('R46.. 0.1 * PCV2 + 0.1 * PCV3 + 0.1 * PCV4
1 + 0.1 * PCV5 + 0.1 * PCV6 + 0.1 * PCV7 + 0.1 * PCV8 =E= YV; ')
C
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
C COEFICIENTE PARA A FUNÇÃO MULTIOBJETIVO
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
C
WRITE(2,1075)B(1),B(2),B(3)
1075 FORMAT('LUCRO.. Z =E= ',F5.2,'*QT1 + ',F5.2,'*QT2 + ',F5.2,'*QT3')
WRITE(2,1076)B(4),B(5),B(6)
1076 FORMAT(' + ',F5.2,'*QT4 + ',F5.2,'*QT7 + ',F5.2,'*QT8 + ')
WRITE(2,1077)B(7),B(8),B(9)
1077 FORMAT('F5.2,'*QT11 + ',F5.2,'*QT12 + ',F5.2,'*QT15 + ')
WRITE(2,1078)B(10),B(11),B(12)
1078 FORMAT('F5.2,'*QT16 + ',F5.2,'*QT17 + ',F5.2,'*QT18 + ')
WRITE(2,1079)B(13),B(14)
1079 FORMAT('F5.2,'*QT21 + ',F5.2,'*QT22 + ')

```

```

WRITE(2,1080)B(16),B(17),B(18)
1080 FORMAT(F5.2,'*QT24 + ',F5.2,'*QT27 + ',F5.2,'*QT28 + ')
WRITE(2,1081)B(19),B(20),B(21)
1081 FORMAT(F5.2,'*QT31 + ',F5.2,'*QT32 - ',F5.2,'*NRF1 - ')
WRITE(2,1082)B(22),B(23),B(24)
1082 FORMAT(F5.2,'*NRF2 - ',F5.2,'*NRF3 - ',F5.2,'*NRF4 - ')
WRITE(2,1083)B(25),B(26),B(27)
1083 FORMAT(F5.2,'*NRF5 - ',F5.2,'*NRF6 - ',F5.2,'*NRF7 - ')
WRITE(2,2083)B(28),B(29),B(30)
2083 FORMAT(F5.2,'*NRF8 + ',F5.2,'*P1 + ',F5.2,'*P2 + ')
WRITE(2,2084)B(31),B(32),B(33),B(34)
2084 FORMAT(F5.2,'*P3 + ',F5.2,'*P5 + ',F5.2,'*P6 + ',F5.2,'*P7 + ')
WRITE(2,2085)B(35),B(36),B(37)
2085 FORMAT(F5.2,'*P8 + ',F5.2,'*P9 + ',F5.2,'*P10 + ')
WRITE(2,2086)B(38),B(39),B(40)
2086 FORMAT(F5.2,'*P11 + ',F5.2,'*P12 + ',F5.2,'*PCV2 + ')
WRITE(2,2087)B(41),B(41),B(43)
2087 FORMAT(F5.2,'*PCV3 + ',F5.2,'*PCV4 + ',F5.2,'*PCV5 + ')
WRITE(2,2088)B(44),B(45),B(46)
2088 FORMAT(F5.2,'*PCV6 + ',F5.2,'*PCV7 + ',F5.2,'*PCV8 + ')
WRITE(2,2788)B(47),B(48),B(49)
2788 FORMAT(F5.2,'*QLO + ',F5.2,'*QUP + ',F5.2,'*QM + ')
WRITE(2,2988)B(50),B(51),B(52)
2988 FORMAT(F5.2,'*HMB + ',F5.2,'*YB + ',F5.2,'*YE;')
WRITE(2,2113)B(53),B(54),B(55)
2113 FORMAT(F5.2,'*YP - ',F5.2,'*YR + ',F5.2,'*YV;')
WRITE(2,*)

```

[illegible]

```
C      CALL EXECUTA
C
      OUTPUT='C:\GAMS386\DAIRESAB.LST'
      OPEN(UNIT=04,FILE=OUTPUT,STATUS='OLD')
      I=1
181   CONTINUE
      READ(4,888)ACHAR
888   FORMAT(12X,A19)
      IF (ACHAR.EQ.'VARIABLE PCV8.L') GO TO 889
      I=I+1
      GO TO 181
889   CONTINUE
C
      DO 9102 I=1,50
      READ(4,9103)Y(I)
9103  FORMAT(49X,F9.4)
9102  CONTINUE
      CLOSE(UNIT=4)
C
      DO 9502 II=1,19
      II=NTR(II)
      FPCN(II)=(10.64*(Y(II)**0.85)*L(II))/((CHW(II)**1.85)*
1(DN(II)**4.87))
9502  CONTINUE
C
      DO 9503 II=1,19
      II=NTR(II)
      DFPC(II)=FPC(II)-FPCN(II)
      IF (ABS(DFPC(II)).GT.TOL) THEN
      DO 9504 I2=1,19
      II=NTR(I2)
      FPC(II)=(FPCN(II)+FPC(II))/2
C
9504  CONTINUE
      WRITE(*,*)' MAIS UMA ITERACAO '
      K=K+1
      NITER=NITER+1
      WRITE(*,*)J,NITER
      QT21=Y(13)
      HMB=Y(49)
      IF (K.GT.50) GO TO 9503
      GO TO 2222
      ELSE
      ENDIF
9503  CONTINUE
C
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
C    CALCULO DA ABERTURA DAS VALVULAS
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
C
      Q=Y(4)
      DP=Y(39)
      D=DN(4)
      KMAX=XKMAXI(1)
      CALL VALV(KMAX,DP,Q,D,PAV)
      PAV2=PAV
```

```
C      Q=Y(6)
DP=Y(40)
D=DN(8)
KMAX=XKMAXI(2)
CALL VALV(KMAX, DP,Q,D, PAV)
PAV3=PAV

C      Q=Y(8)
DP=Y(41)
D=DN(12)
KMAX=XKMAXI(3)
CALL VALV(KMAX, DP,Q,D, PAV)
PAV4=PAV

C      Q=Y(12)
DP=Y(42)
D=DN(18)
KMAX=XKMAXI(4)
CALL VALV(KMAX, DP,Q,D, PAV)
PAV5=PAV

C      Q=Y(15)
DP=Y(43)
D=DN(24)
KMAX=XKMAXI(5)
CALL VALV(KMAX, DP,Q,D, PAV)
PAV6=PAV

C      Q=Y(17)
DP=Y(44)
D=DN(28)
KMAX=XKMAXI(6)
CALL VALV(KMAX, DP,Q,D, PAV)
PAV7=PAV

C      Q=Y(19)
DP=Y(45)
D=DN(32)
KMAX=XKMAXI(7)
CALL VALV(KMAX, DP,Q,D, PAV)
PAV8=PAV

C
C
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
C   GRAVACAO E ORGANIZACAO DOS RESULTADOS
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
C       IF (J.NE.1) GO TO 2901
WRITE(25,2970)
2970 FORMAT(2X,'J',7X,'QM',5X,'HMB',5X,' N ')
2901 CONTINUE
WRITE(25,2979) J,Y(46),Y(49),Y(50)
2979 FORMAT(1X,I2,5X,F6.3,2X,F6.3,2X,F6.1)
C
IF (J.NE.1) GO TO 2701
WRITE(26,2670)
```

```

2670 FORMAT(2X,'J',6X,'HR(1)',2X,'HRN(1)',4X,'HR(2)',2X,'HRN(2)',4X,
1'HR(3)',2X,'HRN(3)',4X,'HR(4)',2X,'HRN(4)',4X,'HR(5)',2X,'HRN(5)',
14X,'HR(6)',2X,'HRN(6)',4X,'HR(7)',2X,'HRN(7)',4X,'HR(8)',2X,
1'HRN(8)')

```

```

2701 CONTINUE

```

```

WRITE(26,2570)J,XNRI(1),Y(20),XNRI(2),Y(21),XNRI(3),Y(22),XNRI(4),
1Y(23),XNRI(5),Y(24),XNRI(6),Y(25),XNRI(7),Y(26),XNRI(8),Y(27)

```

```

2570 FORMAT(1X,I2,5X,F6.2,2X,F6.2,3X,F6.2,2X,F6.2,3X,F6.2,2X,F6.2,
13X,F6.2,2X,F6.2,3X,F6.2,2X,F6.2,3X,F6.2,2X,F6.2,3X,F6.2,
22X,F6.2,3X,F6.2,2X,F6.2)

```

C

```

IF (J.NE.1) GO TO 6701

```

```

WRITE(27,6670)

```

```

6670 FORMAT(2X,'J',7X,'P(1)',4X,'P(2)',5X,'P(3)',4X,'P(5)',5X,
1'P(6)',4X,'P(7)',5X,'P(8)',4X,'P(9)',4X,'P(10)',3X,'P(11)',
14X,'P(12)')

```

```

6701 CONTINUE

```

```

WRITE(27,6570)J,Y(28),Y(29),Y(30),Y(31),Y(32),Y(33),Y(34),Y(35),
1Y(36),Y(37),Y(38)

```

```

6570 FORMAT(1X,I2,5X,F6.2,2X,F6.2,3X,F6.2,2X,F6.2,3X,F6.2,2X,F6.2,
13X,F6.2,2X,F6.2,3X,F6.2,2X,F6.2,3X,F6.2)

```

C

```

IF (J.NE.1) GO TO 6101

```

```

WRITE(28,6172)

```

```

6172 FORMAT(2X,'J',5X,'PCV(2)',2X,'PCV(3)',3X,'PCV(4)',2X,'PCV(5)',3X,
1'PCV(6)',2X,'PCV(7)',3X,'PCV(8)')

```

```

6101 CONTINUE

```

```

WRITE(28,6170)J,Y(39),Y(40),Y(41),Y(42),Y(43),Y(44),Y(45)

```

```

6170 FORMAT(1X,I2,5X,F6.2,2X,F6.2,3X,F6.2,2X,F6.2,3X,F6.2,2X,F6.2,
13X,F6.2)

```

C

```

IF (J.NE.1) GO TO 6991

```

```

WRITE(38,6992)

```

```

6992 FORMAT(2X,'J',5X,'PAV(2)',2X,'PAV(3)',3X,'PAV(4)',2X,'PAV(5)',3X,
1'PAV(6)',2X,'PAV(7)',3X,'PAV(8)')

```

```

6991 CONTINUE

```

```

WRITE(38,6990)J,PAV2,PAV3,PAV4,PAV5,PAV6,PAV7,PAV8

```

```

6990 FORMAT(1X,I2,5X,F6.2,2X,F6.2,3X,F6.2,2X,F6.2,3X,F6.2,2X,F6.2,
13X,F6.2)

```

C

```

IF (J.NE.1) GO TO 9101

```

```

WRITE(29,1172)

```

```

1172 FORMAT(2X,'J',6X,'QT(1)',3X,'QT(2)',4X,'QT(3)',3X,'QT(4)',4X,
1'QT(7)',3X,'QT(8)',2X,'QT(11)',3X,'QT(12)',2X,'QT(15)',3X,
2'QT(16)',2X,'QT(17)',2X,'QT(18)',3X,'QT(21)',2X,'QT(22)',3X,
3'QT(24)',2X,'QT(27)',2X,'QT(28)',3X,'QT(31)',2X,'QT(32)')

```

```

9101 CONTINUE

```

```

WRITE(29,1170)J,Y(1),Y(2),Y(3),Y(4),Y(5),Y(6),Y(7),Y(8),Y(9),
1Y(10),Y(11),Y(12),Y(13),Y(14),Y(15),Y(16),Y(17),Y(18),Y(19)

```

```

1170 FORMAT(1X,I2,5X,F6.3,2X,F6.3,3X,F6.3,2X,F6.3,3X,F6.3,2X,F6.3,
12X,F6.3,3X,F6.3,2X,F6.3,3X,F6.3,2X,F6.3,2X,F6.3,3X,F6.3,2X,F6.3,
13X,F6.3,2X,F6.3,2X,F6.3,3X,F6.3,2X,F6.3)

```

C

```

CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC

```

```

C ATUALIZACAO DE VALORES PARA O PROXIMO INTERVALO

```

```

CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC

```

C

```

      XNRI(1)=Y(20)
      XNRI(2)=Y(21)
      XNRI(3)=Y(22)
      XNRI(4)=Y(23)
      XNRI(5)=Y(24)
      XNRI(6)=Y(25)
      XNRI(7)=Y(26)
      XNRI(8)=Y(27)
C
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
C   FECHAMENTO DOS ARQUIVOS
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
C
      IF (J.LT.24) GO TO 6119
      CLOSE(UNIT=25)
      CLOSE(UNIT=26)
      CLOSE(UNIT=27)
      CLOSE(UNIT=28)
CLOSE(UNIT=29)
      CLOSE(UNIT=38)
      STOP
      END

```

ARQUIVO: LEITOR.FOR

```
C SUBROUTINE LEITOR
C CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
C   ESTA SUBROTINA FAZ A LEITURA DE DADOS FISICOS DA REDE
C   EM ESTUDO - ALCA LESTE - REGIAO METROPOLITANA DE SAO PAULO
C CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
C   DIMENSION X1(100),X2(100),X3(100),X4(100),X5(100),X6(100),
1     NTR(20),NNO(11),X7(20)
      CHARACTER*80 TRECHOS,NOS,RESERV
      INTEGER I,NT,NR
C COMMON/TEC/L(50),DN(50),CHW(50),XNRI(20),XNRMIN(20),XNRMAX(20),
1     FAT(20),CG(30)
C *****NNO: NUMERACAO DOS NOS DA REDE
      DATA NNO/01,02,03,05,06,07,08,09,10,11,12,/
C *****NTR: NUMERACAO DOS TRECHOS DA REDE
      DATA NTR/01,02,03,04,07,08,11,12,15,16,17,18,21,22,23,24,
1       27,28,31,32/
C   TRECHOS='C:\OLIMO\TRECHOS.DAT'
      NOS='C:\OLIMO\NOS.DAT'
      RESERV='C:\OLIMO\RESERV.DAT'
      PI=3.1415927
C CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
C   LEITURA DOS DADOS DOS TRECHOS DA REDE
C CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
C   OPEN(UNIT=01,FILE=TRECHOS,STATUS='OLD')
      READ(1,*)
      READ(1,10) NT
10    FORMAT(20X,I3)
      READ(1,*)
      DO 100 I=1,NT
        READ(1,11) X1(I),X2(I),X3(I)
11    FORMAT(10X,F5.0,5X,F5.3,5X,F5.1)
        II=NTR(I)
        L(II)=X1(I)
        DN(II)=X2(I)
        CHW(II)=X3(I)
100   CONTINUE
      CLOSE(UNIT=1)
C CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
C   LEITURA DOS DADOS DOS NOS DA REDE
C CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
C   OPEN(UNIT=02,FILE=NOS,STATUS='OLD')
      READ(2,*)
      READ(2,12) NN
12    FORMAT(20X,I3)
```


APÊNDICE - C

**MODELAGEM DESENVOLVIDA
ROTINAS COMPUTACIONAIS EM LINGUAGEM FORTRAN
MÓDULO DE OTIMIZAÇÃO – MINOS 5.1**


```

C      K2      VARIABEL AUXILIAR PARA CALCULO DE ROTACAO DA BOMBA      C
C      K3      VARIABEL AUXILIAR PARA CALCULO DE ROTACAO DA BOMBA      C
C      K4      VARIABEL AUXILIAR PARA CALCULO DE ROTACAO DA BOMBA      C
C      K5      VARIABEL AUXILIAR PARA CALCULO DE ROTACAO DA BOMBA      C
C      L(I)    COMPRIMENTO DO TRECHO (M)                                C
C      N      ROTACAO DE OPERACAO DA BOMBA (RPM)                        C
C      NB     NUMERO DE BOMBAS                                           C
C      NN     ROTACAO NORMAL DE OPERACAO DA BOMBA (RPM)                  C
C      NO     NUMERO DE NOS                                              C
C      NP     NUMERO DE PERIODOS                                         C
C      NR     NUMERO DE RESERVATORIOS                                     C
C      NRMIN   ROTACAO MINIMA OPERACIONAL DA BOMBA (RPM)                 C
C      NRMAX   ROTACAO MAXIMA OPERACIONAL DA BOMBA (RPM)                 C
C      NT     NUMERO DE TRECHOS DA REDE HIDRAULICA                       C
C      P(I)    PESOS ASSOCIADOS AS VARIABEIS PARA A FUNCAO OBJETIVO      C
C      PERMIN  PORCENTAGEM MINIMA DE DEFCIT NO ATENDIMENTO A DEMANDA      C
C      PERMAX  PORCENTAGEM MAXIMA DE DEFCIT NO ATENDIMENTO A DEMANDA      C
C      PK(I)   NIVEL DA AGUA NO RESERVATORIO NO INICIO DO INTERVALO (M)  C
C      QA(I)   VAZAO DE ADUCAO (M3/S)                                    C
C      QA1     VAZAO EXPRESSA EM FUNCAO DO NIVEL DO RESERVATORIO 1        C
C      QA2     VAZAO EXPRESSA EM FUNCAO DO NIVEL DO RESERVATORIO 2        C
C      QAL1    VAZAO ADUZIDA AO RESERVATORIO 1                           C
C      QAL2    VAZAO ADUZIDA AO RESERVATORIO 2                           C
C      QT(I)   VAZAO DO TRECHO (M3/S)                                    C
C      Q2      VAZAO DO TRECHO PARA CALCULO DA ABERTURA DA VALVULA      C
C
C      SB(I)   AREA DA SECAO DA BASE DO RESERVATORIO (M2)                C
C      ST(JJ)  AREA DA SECAO TRANSVERSAL DO TUBO (M2)                    C
C      VET2(I) COMPRIMENTO DO TRECHO (M)                                C
C      VET3(I) DIAMETRO DO TUBO (M)                                       C
C      VET4(I) VAZAO INICIAL (M3/S)                                         C
C      VLSUP(JJ) LIMITANTE SUPERIOR DE VAZAO (M3/S)                      C
C      WQMIN(JJ) DEFCIT MINIMO DE ATENDIMENTO A DEMANDA NO INTERVALO JJ  C
C      WQMAX(JJ) DEFCIT MAXIMO DE ATENDIMENTO A DEMANDA NO INTERVALO JJ  C
C      XD1(I)  NUMERO DE UMA PARTICULAR BOMBA                             C
C      XD2(I)  CONSTANTE C0 DA BOMBA                                       C
C      XD3(I)  CONSTANTE C1 DA BOMBA                                       C
C      XD4(I)  CONSTANTE C2 DA BOMBA                                       C
C      XD5(I)  ROTACAO NORMAL DE OPERACAO DA BOMBA (RPM)                  C
C      XD6(I)  ALTURA MANOMETRICA OFERECIDA PELA BOMBA (M)                C
C      XD7(I)  ROTACAO MINIMA OPERACIONAL DA BOMBA (RPM)                  C
C      XD8(I)  ROTACAO MAXIMA OPERACIONAL DA BOMBA (RPM)                  C
C      XD9(I)  ALTURA MANOMETRICA MINIMA OPERACIONAL DA BOMBA (M)        C
C      XD10(I) ALTURA MANOMETRICA MAXIMA OPERACIONAL DA BOMBA (M)        C
C      X1      ABERTURA DA VALVULA NO TRECHO 2(%)                        C
C      X2      ABERTURA DA VALVULA NO TRECHO 6(%)                        C
C      XHN(JJ) DEFCIT NA PRESSAO DISPONIVEL (MCA)                        C
C      XHNMIN  VALOR MIN DE DEFICT NA PRESSAO DISP (MCA)                  C
C      XHNMAX  VALOR MAX DE DEFICT NA PRESSAO DISP (MCA)                  C
C
C      CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
C
C      PROGRAM REHIDR
C
C      C*****
C      DECLARACAO DE VARIABEIS
C      C*****

```

```

C      DIMENSION IVET1(22),VET2(22),VET3(22),VET4(22),A1(2),A2(2),
*      A3(2),A4(2),A5(2),A6(2),A7(22),A8(22),B1(26),B2(26),C1(22),
*      C2(22),C3(22),XD1(22),XD2(22),XD3(22),XD4(22),XD5(22),XD6(22),
*      XD7(22),XD8(22),XD9(22),XD10(22),D(22),QT(22),VLSUP(22),HMX(22),
*      HMN(22),L(22),ST(22),CG(22),SB(2),HR(2),HRN(2),QA(2),IGT(19),
*      IGN(16),PK(2),F2(2),FPC(22),CPMAX(25),CPMIN(25),QVM(2),QVN(2),
*      FO(22),F(22),DIFQ(22),VET4N(22),QDR(25),H(20),HMBS(1),HMBI(1),
*      HMB(1),QV(2),WQ(10),XHN(22),WQMIN(20),WQMAX(20),P(30),DP(2)

C      CHARACTER*80 TUBOS,RESERV,NEUTRA,NOS,BOMBA,PRINT,ACHAR,RESUL,
1      RESUL1,RESUL2,RESUL3,FACTIVEL,INFACIT,PARAM,PESO
      REAL K1,K2,K3,K4,K5,NN,NRMIN,NRMAX,DP,Q,PER,G,PI,VI,E,VMAX,
1      NPMAX,NPMIN,QAL1,QAL2,PERMIN,PERMAX,XHNMIN,XHNMAX,X1,X2,X
      INTEGER N
      DATA IGT/2,4,5,6,8,9,10,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0/
      DATA IGN/4,5,6,9,10,11,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0/

C      C*****
C      INDICACAO DOS PATHS PARA OS ARQUIVOS
C      C*****
C
C      O ARQUIVO TUBOS.DAT FORNECE AS INFORMACOES SOBRE OS TUBOS DA REDE
C
      TUBOS='C:\REDE\REDES5\TUBOS.DAT'
C
C      O ARQUIVO RESERV.DAT FORNECE INFORMACOES SOBRE OS RESERVATORIOS
C
      RESERV='C:\REDE\REDES5\RESERV.DAT'
C
C      O ARQUIVO NEUTRAS.DAT DA INFORMACOES SOBRE O PERFIL DE DEMANDA DE CONSUMO
C
      NEUTRA='C:\REDE\REDES5\NEUTRAS.DAT'
C
C      O ARQUIVO BOMBA.DAT FORNECE INFORMACOES SOBRE A BOMBA (BOOSTER)
C
      BOMBA='C:\REDE\REDES5\BOMBA.DAT'
C
C      O ARQUIVO NOS.DAT FORNECE INFORMACOES SOBRE OS NOS DA REDE
C
      NOS='C:\REDE\REDES5\NOS.DAT'
C
C      O ARQUIVO RESUL.DAT FORNECE INFORMACOES SOBRE RESULTADOS DE VAZoes
C
      RESUL='C:\REDE\REDES5\RESUL.DAT'
C
C      O ARQUIVO RESUL1.DAT FORNECE INFORMACOES SOBRE RESULTADOS DE PRESSAO
C
      RESUL1='C:\REDE\REDES5\RESUL1.DAT'
C
C      O ARQUIVO RESUL2.DAT FORNECE INFORMACOES SOBRE OS DEFCITS NA DEMANDA
C
      RESUL2='C:\REDE\REDES5\RESUL2.DAT'
C
C      O ARQUIVO RESUL3.DAT FORNECE INFORMACOES SOBRE OS DEFCITS NA PRESSAO C
MINIMA

```

```

C      RESUL3='C:\REDE\REDE5\RESUL3.DAT'
C
C      O ARQUIVO PRINT.OUT FORNECE INFORMACOES SOBRE O ARQUIVO DE SAIDA DO
C      MINOS
C
C      PRINT='C:\REDE\REDE5\PRINT.OUT'
C
C      O ARQUIVO SUMM.OUT FORNECE INFORMACOES SOBRE AS INFACIBILIDADES
C
C      INFAC='C:\REDE\REDE5\SUMM.OUT'
C
C      O ARQUIVO PARAMETR.DAT FORNECE INFORMACOES SOBRE OS PARAMETROS PRA
C      PROC.
C
C      PARAM='C:\REDE\REDE5\PARAMETR.DAT'
C
C      O ARQUIVO PESOS.DAT FORNECE INFORMACOES SOBRE OS PESOS PARA A FUNCAO
C      OBJETIVO
C
C      PESO='C:\REDE\REDE5\PESOS.DAT'
C
C      *****
C      LEITURA DE ARQUIVOS COM PARAMETROS
C      *****
C
C      OPEN(UNIT=41,FILE=PARAM,STATUS='OLD')
C      READ(41,*)
C      READ(41,*)
C      READ(41,*)
C      READ(41,6801)G
6801  FORMAT(18X,F4.2)
C      READ(41,6802)PI
6802  FORMAT(18X,F10.8)
C      READ(41,6803)VI
6803  FORMAT(18X,F8.6)
C      READ(41,6804)E
6804  FORMAT(18X,F6.4)
C      READ(41,6805)VMAX
6805  FORMAT(18X,F4.2)
C      READ(41,6806)NPMAX
6806  FORMAT(17X,F5.2)
C      READ(41,6807)NPMIN
6807  FORMAT(17X,F5.2)
C      DO 3977 R=1,2
C      READ(41,6808)DP(R)
6808  FORMAT(17X,F5.2)
3977  CONTINUE
C      READ(41,6809)QAL1
6809  FORMAT(18X,F4.2)
C      READ(41,6810)QAL2
6810  FORMAT(18X,F4.2)
C      READ(41,6811)PERMIN
6811  FORMAT(18X,F4.2)
C      READ(41,6812)PERMAX
6812  FORMAT(18X,F4.2)
C      READ(41,6813)XHNMIN

```

```

6813 FORMAT(18X,F4.2)
      READ(41,6814)XHNMAX
6814 FORMAT(18X,F4.2)
      CLOSE(UNIT=41)
C
C*****
C      LEITURA DE ARQUIVO COM OS PESOS PARA A FUNCAO OBJETIVO
C*****
C
      OPEN(UNIT=61,FILE=PESO,STATUS='OLD')
      READ(61,*)
      READ(61,*)
      READ(61,*)
      DO 7618 II=1,18
      READ(61,6101)P(II)
6101 FORMAT(15X,F7.2)
7618 CONTINUE
      CLOSE(UNIT=61)
C
C*****
C      CONTADOR DO NUMERO DE VEZES QUE A ROTINA DE OTIMIZACAO E ACIONADA
C*****
C
      K=0
C
C*****
C      ABERTURA DOS ARQUIVOS PARA GRAVACAO DOS RESULTADOS
C*****
C
      OPEN(UNIT=25,FILE=RESUL,STATUS='OLD')
      OPEN(UNIT=26,FILE=RESUL1,STATUS='OLD')
      OPEN(UNIT=27,FILE=RESUL2,STATUS='OLD')
      OPEN(UNIT=28,FILE=RESUL3,STATUS='OLD')
C
C*****
C      INICIO DO PROCESSAMENTO DO HORIZONTE DE 24 HORAS
C*****
C
      DO 1009 J=1,24
      WRITE(*,*)J
      IF (J.NE.1) GO TO 2009
C
C*****
C      LEITURA DOS TRECHOS DA REDE HIDRAULICA
C*****
C
      OPEN(UNIT=1,FILE=TUBOS,STATUS='OLD')
      READ(1,*)
      READ(1,10)NT
10  FORMAT(I4)
      READ(1,*)
      DO 15 I=1,NT
      READ(1,*)IVET1(I),VET2(I),VET3(I),VET4(I)
15  CONTINUE
      CLOSE(UNIT=1)
C
C*****

```

```

C      LEITURA DOS DADOS DOS RESERVATORIOS
C*****
C
      OPEN(UNIT=2,FILE=RESERV,STATUS='OLD')
      READ(2,*)
      READ(2,50)NR
50  FORMAT(I4)
      READ(2,*)
      DO 65 I=1,NR
      READ(2,*)A1(I),A2(I),A3(I),A4(I),A5(I),A6(I),A7(I),A8(I)
      SB(I)=A4(I)
      QVM(I)=A7(I)
      QVN(I)=A8(I)
      HMX(I)=A2(I)
      HMN(I)=A3(I)
      F2(I)=3600/SB(I)
C
C*****
C      PARA O PRIMEIRO INTERVALO O NIVEL DO RESERVATORIO E O INICIAL DO
C      HORIZONTE PARA OS SEGUINTEs, E IGUAL AO FINAL DO INTERVALO ANTERIOR
C*****
C
      IF (J.EQ.1) HR(I)=A5(I)
C
      65 CONTINUE
      CLOSE(UNIT=2)
C
C*****
C      LEITURA DA CURVA NEUTRA(CN)
C*****
C
      OPEN(UNIT=3,FILE=NEUTRA,STATUS='OLD')
      READ(3,*)
      READ(3,80)NP
80  FORMAT(I2)
      READ(3,*)
      DO 100 I=1,NP
      READ(3,*)B1(I),B2(I)
100 CONTINUE
      CLOSE(UNIT=3)
C
C*****
C      LEITURA DAS BOMBAS
C*****
C
      OPEN(UNIT=4,FILE=BOMBA,STATUS='OLD')
      READ(4,*)
      READ(4,115)NB
115 FORMAT(I3)
      READ(4,*)
      DO 130 I=1,NB
      READ(4,339)XD1(I),XD2(I),XD3(I),XD4(I),XD5(I),XD6(I),XD7(I),
1XD8(I),XD9(I),XD10(I)
339 FORMAT(2X,F4.0,4X,F7.3,2X,F7.3,2X,F7.3,3X,F5.0,4X,F5.0,2X,F5.0,
12X,F6.0,4X,F6.0,4X,F6.0)
      C0A=XD2(I)
      C1A=XD3(I)

```

```

      C2A=XD4(I)
      NN=XD5(I)
      HMB(1)=XD6(I)
      NRMIN=XD7(I)
      NRMAX=XD8(I)
      HMBI(1)=XD9(I)
      HMBS(1)=XD10(I)
130  CONTINUE
      CLOSE(UNIT=4)
C
C*****
C      LEITURA DOS NOS DA REDE HIDRAULICA
C*****
C
      OPEN(UNIT=5,FILE=NOS,STATUS='OLD')
      READ(5,*)
      READ(5,145)NO
145  FORMAT(I3)
      READ(5,*)
      DO 155 I=1,NO
      CG(I)=C2(I)
      READ(5,*)C1(I),C2(I),C3(I)
155  CONTINUE
      CLOSE(UNIT=5)
C
C*****
C      A PARTIR DESTES PONTOS O PROCESSAMENTO E FEITO ITERATIVAMENTE PARA QUE
C      OCORRA A CONVERGENCIA NO CALCULO DAS VAZOES NOS TRECHOS
C*****
C
2009 CONTINUE
2299 CONTINUE
      QA1=QAL1*F2(1)
      QA2=QAL2*F2(2)
      IF((J.EQ.9).OR.(J.EQ.10).OR.(J.EQ.11).OR.(J.EQ.12).OR.(J.EQ.13)
1.OR.(J.EQ.14).OR.(J.EQ.15).OR.(J.EQ.16).OR.(J.EQ.17).OR.(J.EQ.18)
2.OR.(J.EQ.19).OR.(J.EQ.20))THEN
      QA(1)=QA1*1.25
      QA(2)=QA2*1.25
      ELSE
      QA(1)=QA1*0.75
      QA(2)=QA2*0.75
      ENDIF
C
C*****
C      AJUSTE DO VALOR DE DEMANDA PARA CADA HORA DO PROCESSAMENTO
C*****
C
      DO 551 I=1,NO
      QDR(I)=-(C3(I)*B2(J))
551  CONTINUE
C
C*****
C
      DO 7551 I=1,NO
      JJ=IGN(I)
      WQMIN(JJ)=PERMIN*QDR(I)

```

```

      WQMAX(JJ)=PERMAX*QDR(I)
7551 CONTINUE
C
C*****
C      CALCULO DA VAZAO MAXIMA NOS TRECHOS
C*****
C
      DO 879 I=1,NT
      JJ=IGT(I)
      QT(JJ)=VET4(I)
      L(JJ)=VET2(I)
      D(JJ)=VET3(I)
      ST(JJ)=PI*(D(JJ)**2)/4
      VLSUP(JJ)=ST(JJ)*VMAX
C
C*****
C      CALCULO DO FATOR DE ATRITO PARA CADA TRECHO DA MALHA
C*****
C
      FO(JJ)=0.025
1000 CONTINUE
      FI=((0.27*E)/D(JJ))
      FI=FI+((1.97135*VI*D(JJ))/(ABS(QT(JJ))*((FO(JJ)**0.5))))
      F(JJ)=(1/(-2*ALOG10(FI)))**2
      DF=F(JJ)-FO(JJ)
      IF (ABS(DF).LT.0.00001) GO TO 1001
      FO(JJ)=F(JJ)
      GO TO 1000
1001 CONTINUE
C
C*****
C      CALCULO DE UM FATOR DE PERDA DE CARGA QUE DERIVA DA FORMULA UNIVERSAL
C*****
C
      FPC(JJ)=((8*FO(JJ)*L(JJ)*QT(JJ))/(PI*PI*(D(JJ)**5)*G))
      IF (QT(JJ).LT.0) FPC(JJ)=-FPC(JJ)
C
      879 CONTINUE
C
C*****
C      CALCULOS DOS FATORES DA BOMBA PARA ROTACAO VARIAVEL
C*****
C
      K1=-(C1A*NN)/(2*C0A)
      K2=(NN/(2*C0A))
      K3=SQRT((C1A*C1A)-(4*C0A*C2A)+((4*C0A*HMB(1))/(QT(2)*QT(2))))
      K4=K2*K3
      K5=K1+K4
C
C*****
C      DEFINICAO DAS COTAS PIEZOMETRICAS LIMITES
C*****
C
      IND=0
      DO 750 I=1,NO
      JJ=IGN(I)

```

```

      CG(JJ)=C2(I)
      CPMAX(JJ)=CG(JJ)+NPMAX
      CPMIN(JJ)=CG(JJ)+NPMIN
750 CONTINUE
C
C*****
C      MONTADOR DO ARQUIVO "SPECS.DAT", PARA A ROTINA DE PL "MINOS"
C*****
C
      OPEN(UNIT=7,FILE='SPECS.DAT',STATUS='UNKNOWN')
      WRITE(7,850)
850 FORMAT('BEGIN PROGPL PROBLEM')
      WRITE(7,855)
855 FORMAT(3X,'MINIMIZE')
      WRITE(7,860)
860 FORMAT(3X,'ROWS',9X,'150',/,3X,'COLUMNS',6X,'350',/,3X,'ELEMENTS',
      15X,'1800',/,3X,'SUMMARY FILE',1X,'9')
      WRITE(7,865)
865 FORMAT('END PROGPL PROBLEM')
      CLOSE (UNIT=7)
C
C*****
C      MONTADOR DO ARQUIVO "MPS.DAT", PARA A ROTINA DE PL "MINOS"
C*****
C
      OPEN(6,FILE='MPS.DAT',STATUS='UNKNOWN')
C
C*****
C      MONTAGEM DAS COLUNAS
C*****
C
      WRITE(6,158)
158 FORMAT('NAME',10X,'PROGPL',/, 'ROWS')
      WRITE(6,159)
159 FORMAT(1X,'E',2X,'RES1',/,
      11X,'E',2X,'ADUC1',/,
      11X,'E',2X,'ADUC2',/,
      11X,'E',2X,'RES2',/,
      11X,'E',2X,'BAL04',/,
      11X,'E',2X,'BAL05',/,
      11X,'E',2X,'BAL06',/,
      11X,'E',2X,'BAL09',/,
      11X,'E',2X,'BAL10',/,
      11X,'E',2X,'BAL11')
      WRITE(6,160)
160 FORMAT(1X,'E',2X,'PER02',/,
      11X,'E',2X,'PER04',/,
      11X,'E',2X,'PER05',/,
      11X,'E',2X,'PER06',/,
      11X,'E',2X,'PER08',/,
      11X,'E',2X,'PER09',/,
      11X,'E',2X,'PER10')
      WRITE(6,165)
165 FORMAT(1X,'L',2X,'CT02',/,
      11X,'E',2X,'CT04',/,
      11X,'E',2X,'CT05',/,
      11X,'E',2X,'CT06',/,

```

```

11X, 'L', 2X, 'CT08', /,
11X, 'E', 2X, 'CT09', /,
11X, 'E', 2X, 'CT10', /,
11X, 'E', 2X, 'ROTA', /,
11X, 'N', 2X, 'FOBJ1')
DO 444 JI=1, NR
  PK(JI)=HR(JI)
444 CONTINUE
  WRITE(6, 168)
168 FORMAT('COLUMNS')
  WRITE(6, 971)
971 FORMAT(4X, 'VNR(1)', 4X, 'RES1', 11X, '1.0', 7X, 'ADUC1', 10X, '-1.0')
  WRITE(6, 972)
972 FORMAT(4X, 'VNR(2)', 4X, 'RES2', 11X, '1.0', 7X, 'ADUC2', 10X, '-1.0')
  WRITE(6, 170)
170 FORMAT(4X, 'HRN(1)', 4X, 'CT02', 10X, '-1.0', 7X, 'ADUC1', 11X, '1.0')
  WRITE(6, 171)
171 FORMAT(4X, 'HRN(1)', 4X, 'CT08', 10X, '-1.0')
  WRITE(6, 185)
185 FORMAT(4X, 'HRN(2)', 4X, 'CT06', 11X, '1.0', 7X, 'ADUC2', 11X, '1.0')
  WRITE(6, 186) F2(1), P(1)
186 FORMAT(4X, 'QV(1)', 5X, 'RES1', 10X, F5.2, 6X, 'FOBJ1', 8X, F7.2)
  WRITE(6, 187) F2(2), P(2)
187 FORMAT(4X, 'QV(2)', 5X, 'RES2', 10X, F5.2, 6X, 'FOBJ1', 8X, F7.2)
  WRITE(6, 190) F2(1), -FPC(2), K5, P(3)
190 FORMAT(4X, 'QT(2)', 5X, 'BAL04', 10X, '1.0', 7X, 'RES1', 11X, F5.2, /,
14X, 'QT(2)', 5X, 'PER02', 7X, F8.3, 5X, 'ROTA', 8X, F8.3, /,
14X, 'QT(2)', 5X, 'FOBJ1', 7X, F7.2)
  WRITE(6, 195) -FPC(4)
195 FORMAT(4X, 'QT(4)', 5X, 'BAL05', 10X, '1.0', /,
14X, 'QT(4)', 5X, 'BAL04', 9X, '-1.0', /,
14X, 'QT(4)', 5X, 'PER04', 7X, F8.3)
  WRITE(6, 205) -FPC(5)
205 FORMAT(4X, 'QT(5)', 5X, 'BAL06', 10X, '1.0', 7X, 'BAL05', 10X, '-1.0', /,
14X, 'QT(5)', 5X, 'PER05', 7X, F8.3)
  WRITE(6, 225) -FPC(6)
225 FORMAT(4X, 'QT(6)', 5X, 'BAL05', 9X, '-1.0', /,
14X, 'QT(6)', 5X, 'PER06', 7X, F8.3)
  WRITE(6, 230) F2(2)
230 FORMAT(4X, 'QT(6)', 7X, 'RES2', 11X, F5.2)
  WRITE(6, 265) F2(1), -FPC(8)
265 FORMAT(4X, 'QT(8)', 5X, 'BAL09', 10X, '1.0', 7X, 'RES1', 11X, F5.2, /,
14X, 'QT(8)', 5X, 'PER08', 7X, F8.3)
  WRITE(6, 285) -FPC(9)
285 FORMAT(4X, 'QT(9)', 5X, 'BAL10', 10X, '1.0', 7X, 'BAL09', 10X, '-1.0', /,
14X, 'QT(9)', 5X, 'PER09', 7X, F8.3)
  WRITE(6, 305) -FPC(10)
305 FORMAT(4X, 'QT(10)', 4X, 'BAL11', 10X, '1.0', 7X, 'BAL10', 10X, '-1.0', /,
14X, 'QT(10)', 4X, 'PER10', 7X, F8.3)
  WRITE(6, 331)
331 FORMAT(4X, 'N', 9X, 'ROTA', 11X, '-1.0')
C
C*****
C      PERDA DE CARGA NOS TRECHOS
C*****
C
      WRITE(6, 335)

```

```

335 FORMAT(4X,'PC(2)',5X,'PER02',10X,'1.0',7X,'CT02',12X,'1.0')
WRITE(6,340)
340 FORMAT(4X,'PC(4)',5X,'PER04',10X,'1.0',7X,'CT04',12X,'1.0')
WRITE(6,345)
345 FORMAT(4X,'PC(5)',5X,'PER05',10X,'1.0',7X,'CT05',12X,'1.0')
WRITE(6,348)
348 FORMAT(4X,'PC(6)',5X,'PER06',10X,'1.0',7X,'CT06',12X,'1.0')
WRITE(6,355)
355 FORMAT(4X,'PC(8)',5X,'PER08',10X,'1.0',7X,'CT08',12X,'1.0')
WRITE(6,360)
360 FORMAT(4X,'PC(9)',5X,'PER09',10X,'1.0',7X,'CT09',12X,'1.0')
WRITE(6,365)
365 FORMAT(4X,'PC(10)',4X,'PER10',10X,'1.0',7X,'CT10',12X,'1.0')
C
C*****
C      COMPUTO DAS CARGAS NOS NOS
C*****
C
      WRITE(6,395)
395 FORMAT(4X,'HN(4)',5X,'CT02',11X,'1.0',7X,'CT04',11X,'-1.0')
WRITE(6,400)
400 FORMAT(4X,'HN(5)',5X,'CT04',11X,'1.0',7X,'CT05',11X,'-1.0',/,
14X,'HN(5)',5X,'CT(06)',10X,'-1.0')
WRITE(6,405)
405 FORMAT(4X,'HN(6)',5X,'CT05',11X,'1.0')
WRITE(6,415)
415 FORMAT(4X,'HN(9)',5X,'CT08',11X,'1.0',7X,'CT09',11X,'-1.0',/,
14X,'HN(9)',5X,'CT15',10X,'-1.0')
WRITE(6,420)
420 FORMAT(4X,'HN(10)',4X,'CT09',11X,'1.0')
WRITE(6,425)
425 FORMAT(4X,'HN(11)',4X,'CT06',11X,'1.0')
C
C*****
C      CARGA MANOMETRICA OFERECIDA PELA BOMBA
C*****
C
      WRITE(6,430)
430 FORMAT(4X,'HMB(1)',4X,'CT02',10X,'-1.0')
WRITE(6,627)P(4)
627 FORMAT(4X,'WQ(6)',5X,'BAL06',10X,'1.0',7X,'FOBJ1',8X,F7.2)
WRITE(6,628)P(5)
628 FORMAT(4X,'WQ(10)',5X,'BAL10',10X,'1.0',7X,'FOBJ1',8X,F7.2)
WRITE(6,629)P(6)
629 FORMAT(4X,'WQ(11)',4X,'BAL11',10X,'1.0',7X,'FOBJ1',8X,F7.2)
C      WRITE(6,1697)P(9)
C 1697 FORMAT(4X,'XHN(4)',4X,'CT02',11X,'1.0',7X,'FOBJ1',8X,F7.2)
C      WRITE(6,2627)P(10)
C 2627 FORMAT(4X,'XHN(5)',4X,'CT04',11X,'1.0',7X,'FOBJ1',8X,F7.2)
C      WRITE(6,3627)P(11)
C 3627 FORMAT(4X,'XHN(5)',4X,'CT04',11X,'1.0',7X,'FOBJ1',8X,F7.2)
C      WRITE(6,4627)P(12)
C 4627 FORMAT(4X,'XHN(6)',4X,'CT05',11X,'1.0',7X,'FOBJ1',8X,F7.2)
C      WRITE(6,6627)P(13)
C 6627 FORMAT(4X,'XHN(8)',4X,'CT07',11X,'1.0',7X,'FOBJ1',8X,F7.2)
C      WRITE(6,7627)P(14)
C 7627 FORMAT(4X,'XHN(9)',4X,'CT08',11X,'1.0',7X,'FOBJ1',8X,F7.2)

```

```

C      WRITE(6,8627)P(15)
C 8627 FORMAT(4X,'XHN(10)',3X,'CT09',11X,'1.0',7X,'FOBJ1',8X,F7.2)
C      WRITE(6,5627)P(16)
C 5627 FORMAT(4X,'XHN(11)',3X,'CT06',11X,'1.0',7X,'FOBJ1',8X,F7.2)
C      WRITE(6,9627)
C 9627 FORMAT(4X,'XHN(11)',3X,'CT10',11X,'1.0')
C      WRITE(6,9527)
C 9527 FORMAT(4X,'XHN(11)',3X,'CT13',11X,'1.0')
C      WRITE(6,9427)P(17)
C 9427 FORMAT(4X,'XHN(14)',3X,'CT15',11X,'1.0',7X,'FOBJ1',8X,F7.2)
C      WRITE(6,9327)P(18)
C 9327 FORMAT(4X,'XHN(15)',3X,'CT16',11X,'1.0',7X,'FOBJ1',8X,F7.2)
C
C*****
C      DEMANDAS
C*****
C
C      WRITE(6,435)
C 435 FORMAT('RHS')
C      WRITE(6,436)HR(1),HR(2),QA(1),QA(2),QDR(1),QDR(2),QDR(3),QDR(4),
C      1QDR(5),QDR(6),DP(1),DP(2)
C 436 FORMAT(4X,'DEMANDS',3X,'RES1',7X,F9.3,5X,'RES2',8X,F9.3,/,
C      14X,'DEMANDS',3X,'ADUC1',10X,F6.4,4X,'ADUC2',11X,F6.4,/,
C      14X,'DEMANDS',3X,'BAL04',10X,F5.3,5X,'BAL05',11X,F5.3,/,
C      14X,'DEMANDS',3X,'BAL06',10X,F5.3,5X,'BAL09',11X,F5.3,/,
C      14X,'DEMANDS',3X,'BAL10',10X,F5.3,5X,'BAL11',11X,F5.3,/,
C      14X,'DEMANDS',3X,'PER02',9X,F4.1,7X,'PER04',11X,'0.0',/,
C      14X,'DEMANDS',3X,'PER05',10X,'0.0',7X,'PER06',11X,F4.1,/,
C      14X,'DEMANDS',3X,'PER08',9X,'0.0',7X,'PER09',11X,'0.0',/,
C      14X,'DEMANDS',3X,'PER10',10X,'0.0')
C      WRITE(6,437)
C 437 FORMAT(4X,'DEMANDS',3X,'CT02',11X,'0.0',7X,'CT04',12X,'0.0',/,
C      14X,'DEMANDS',3X,'CT05',11X,'0.0',7X,'CT06',12X,'0.0',/,
C      14X,'DEMANDS',3X,'CT08',11X,'0.0',7X,'CT09',12X,'0.0',/,
C      14X,'DEMANDS',3X,'CT10',11X,'0.0',/,
C      14X,'DEMANDS',3X,'ROTA',11X,'0.0')
C
C*****
C      LIMITANTES INFERIOS E SUPERIORES
C*****
C
C      WRITE(6,439)
C 439 FORMAT('BOUNDS')
C      WRITE(6,545)HMX(1)
C 545 FORMAT(1X,'UP',1X,'BOUND1',4X,'HRN(1)',7X,F6.2)
C      WRITE(6,550)HMX(2)
C 550 FORMAT(1X,'UP',1X,'BOUND1',4X,'HRN(2)',7X,F6.2)
C      WRITE(6,755)HMN(1)
C 755 FORMAT(1X,'LO',1X,'BOUND1',4X,'HRN(1)',7X,F6.2)
C      WRITE(6,760)HMN(2)
C 760 FORMAT(1X,'LO',1X,'BOUND1',4X,'HRN(2)',7X,F6.2)
C      WRITE(6,761)QVM(1)
C 761 FORMAT(1X,'UP',1X,'BOUND1',4X,'QV(1)',8X,F5.2)
C      WRITE(6,762)QVM(2)
C 762 FORMAT(1X,'UP',1X,'BOUND1',4X,'QV(2)',8X,F5.2)
C      WRITE(6,763)QVN(1)
C 763 FORMAT(1X,'LO',1X,'BOUND1',4X,'QV(1)',8X,F5.2)

```

```

        WRITE(6,764)QVN(2)
764  FORMAT(1X,'LO',1X,'BOUND1',4X,'QV(2)',8X,F5.2)
        WRITE(6,765)HMBS(1)
765  FORMAT(1X,'UP',1X,'BOUND1',4X,'HMB(1)',7X,F6.2)
        WRITE(6,766)HMBI(1)
766  FORMAT(1X,'LO',1X,'BOUND1',4X,'HMB(1)',7X,F6.2)
        WRITE(6,1765)NRMAX
1765  FORMAT(1X,'UP',1X,'BOUND1',4X,'N',10X,F8.2)
        WRITE(6,1766)NRMIN
1766  FORMAT(1X,'LO',1X,'BOUND1',4X,'N',10X,F8.2)
        WRITE(6,565)VLSUP(2)
565  FORMAT(1X,'UP',1X,'BOUND1',4X,'QT(2)',10X,F6.4)
        WRITE(6,566)VLSUP(4)
566  FORMAT(1X,'UP',1X,'BOUND1',4X,'QT(4)',10X,F6.4)
        WRITE(6,575)VLSUP(5)
575  FORMAT(1X,'UP',1X,'BOUND1',4X,'QT(5)',10X,F6.4)
        WRITE(6,585)VLSUP(6)
585  FORMAT(1X,'UP',1X,'BOUND1',4X,'QT(6)',10X,F6.4)
        WRITE(6,586)VLSUP(8)
586  FORMAT(1X,'UP',1X,'BOUND1',4X,'QT(8)',10X,F6.4)
        WRITE(6,595)VLSUP(9)
595  FORMAT(1X,'UP',1X,'BOUND1',4X,'QT(9)',10X,F6.4)
        WRITE(6,605)VLSUP(10)
605  FORMAT(1X,'UP',1X,'BOUND1',4X,'QT(10)',10X,F6.4)
C
C*****
C      LIMITACAO DE VAZAO NOS TRECHOS
C*****
C
        WRITE(6,770)-VLSUP(2)
770  FORMAT(1X,'LO',1X,'BOUND1',4X,'QT(2)',10X,F6.4)
        WRITE(6,771)-VLSUP(4)
771  FORMAT(1X,'LO',1X,'BOUND1',4X,'QT(4)',10X,F6.4)
        WRITE(6,780)-VLSUP(5)
780  FORMAT(1X,'LO',1X,'BOUND1',4X,'QT(5)',10X,F6.4)
        WRITE(6,790)-VLSUP(6)
790  FORMAT(1X,'LO',1X,'BOUND1',4X,'QT(6)',10X,F6.4)
        WRITE(6,799)-VLSUP(8)
799  FORMAT(1X,'LO',1X,'BOUND1',4X,'QT(8)',10X,F6.4)
        WRITE(6,800)-VLSUP(9)
800  FORMAT(1X,'LO',1X,'BOUND1',4X,'QT(9)',10X,F6.4)
        WRITE(6,810)-VLSUP(10)
810  FORMAT(1X,'LO',1X,'BOUND1',4X,'QT(10)',10X,F6.4)
C
C*****
C      LIMITACAO DAS COTAS PIEZOMETRICAS
C*****
C
        WRITE(6,440)CPMAX(4)
440  FORMAT(1X,'UP',1X,'BOUND1',4X,'HN(4)',8X,F6.2)
        WRITE(6,450)CPMAX(5)
450  FORMAT(1X,'UP',1X,'BOUND1',4X,'HN(5)',8X,F6.2)
        WRITE(6,460)CPMAX(6)
460  FORMAT(1X,'UP',1X,'BOUND1',4X,'HN(6)',8X,F6.2)
        WRITE(6,470)CPMAX(9)
470  FORMAT(1X,'UP',1X,'BOUND1',4X,'HN(9)',8X,F6.2)
        WRITE(6,480)CPMAX(10)

```

```

480 FORMAT(1X,'UP'1X,'BOUND1',4X,'HN(10)',8X,F6.2)
WRITE(6,490)CPMAX(11)
490 FORMAT(1X,'UP',1X,'BOUND1',4X,'HN(11)',8X,F6.2)
WRITE(6,645)CPMIN(4)
645 FORMAT(1X,'LO',1X,'BOUND1',4X,'HN(4)',8X,F6.2)
WRITE(6,655)CPMIN(5)
655 FORMAT(1X,'LO',1X,'BOUND1',4X,'HN(5)',8X,F6.2)
WRITE(6,665)CPMIN(6)
665 FORMAT(1X,'LO',1X,'BOUND1',4X,'HN(6)',8X,F6.2)
WRITE(6,675)CPMIN(9)
675 FORMAT(1X,'LO',1X,'BOUND1',4X,'HN(9)',8X,F6.2)
WRITE(6,685)CPMIN(10)
685 FORMAT(1X,'LO',1X,'BOUND1',4X,'HN(10)',8X,F6.2)
WRITE(6,695)CPMIN(11)
695 FORMAT(1X,'LO',1X,'BOUND1',4X,'HN(11)',8X,F6.2)
WRITE(6,1035)WQMAX(6)
1035 FORMAT(1X,'UP'1X,'BOUND1',4X,'WQ(6)',8X,F6.2)
WRITE(6,1036)WQMIN(6)
1036 FORMAT(1X,'LO',1X,'BOUND1',4X,'WQ(6)',8X,F6.2)
WRITE(6,1037)WQMAX(10)
1037 FORMAT(1X,'UP'1X,'BOUND1',4X,'WQ(10)',8X,F6.2)
WRITE(6,1038)WQMIN(10)
1038 FORMAT(1X,'LO',1X,'BOUND1',4X,'WQ(10)',8X,F6.2)
WRITE(6,1039)WQMAX(11)
1039 FORMAT(1X,'UP'1X,'BOUND1',4X,'WQ(11)',7X,F6.2)
WRITE(6,1040)WQMIN(11)
1040 FORMAT(1X,'LO',1X,'BOUND1',4X,'WQ(11)',7X,F6.2)
WRITE(6,845)
845 FORMAT('ENDATA')
CLOSE(UNIT=6)

C
C*****
C      CHAMADA DO ROTINA DE OTIMIZACAO
C*****
C
C      CALL EXEOTM
C      K=K+1
C
C*****
C      ABERTURA DO ARQUIVO "PRINT.OUT" PARA OBTENCAO DE VALORES OTIMIZADOS
C*****
C
C      I=1
C      OPEN(UNIT=11,FILE=PRINT,STATUS='OLD')
181  CONTINUE
C      READ(11,888)ACHAR
888  FORMAT(10X,A5)
C      IF (ACHAR.EQ.'FOBJ1') GO TO 889
C      I=I+1
C      GO TO 181
889  CONTINUE
C      DO 3570 I=1,7
C      READ(11,*)
3570 CONTINUE
C      DO 3571 I=1,2
C      READ(11,152)HRN(I)
152  FORMAT(31X,F9.5)

```

```

3571 CONTINUE
      DO 3572 I=1,2
        READ(11,4572)QV(I)
4572  FORMAT(32X,F8.5)
3572 CONTINUE
      DO 1578 I=1,12
        READ(11,151)VET4N(I)
151   FORMAT(32X,F8.5)
1578 CONTINUE
      READ(11,1151)N
1151  FORMAT(30X,I4)
      DO 7578 I=1,12
        READ(11,*)
7578  CONTINUE
      DO 7579 I=1,10
        READ(11,7580)H(I)
7580  FORMAT(31X,F9.5)
7579  CONTINUE
      READ(11,9572)HMB(1)
9572  FORMAT(32X,F5.2)
      DO 9011 I=1,5
        READ(11,9012)WQ(I)
9012  FORMAT(32X,F8.5)
9011  CONTINUE
      DO 9099 I=1,10
        READ(11,9098)XHN(I)
9098  FORMAT(32X,F8.5)
9099  CONTINUE
C
C*****
C   VERIFICACAO DA CONVERGENCIA DOS VALORES DE VAZAO ENTRE AS ITERACOES
C*****
C
      DO 1178 I=1,12
        DIFQ(I)=VET4(I)-VET4N(I)
        IF (ABS(DIFQ(I)).GT.0.00005) GO TO 969
1178  CONTINUE
        CLOSE(UNIT=11)
        GO TO 1199
969   CONTINUE

      NI=NI+1
      IF (NI.LT.30) GO TO 7355
      WRITE(*,*)
      WRITE(*,9575)
9575  FORMAT('          EXCEDIDO NUMERO MAXIMO DE ITERACOES')
      WRITE(*,*)
      WRITE(*,8575)J,I
8575  FORMAT('          NO PERIODO: ',I2,' E TRECHO: ',I2,/)
      PER=(DIFQ(I)/VET4(I))*100
      WRITE(*,6333)PER
6333  FORMAT('          DIFERENCA PERCENTUAL = ',F5.2, '%')
      WRITE(*,*)
      PAUSE
      GO TO 1199
7355  CONTINUE
      CLOSE(UNIT=11)

```

```

        DO 2233 I=1,12
        VET4(I)= (VET4(I)+VET4N(I))/2
2233  CONTINUE
        GO TO 2299
1199  CONTINUE
        CLOSE(UNIT=11)
        NI=0
C
C*****
C    VERIFICA+EO DE INFATIBILIDADES
C*****
C
        OPEN(UNIT=31,FILE=INFACT,STATUS='OLD')
        M=1
981  CONTINUE
        READ(31,988)ACHAR
988  FORMAT(1X,A4)
        IF (ACHAR.EQ.'EXIT') GO TO 989
        M=M+1
        GO TO 981
989  CONTINUE
        CLOSE(UNIT=31)
        OPEN(UNIT=31,FILE=INFACT,STATUS='OLD')
        DO 537 I=1,M-1
        READ(31,*)
537  CONTINUE
        READ(31,388)FACTIVEL
388  FORMAT(1X,A30)
        IF (FACTIVEL.EQ.'EXIT -- OPTIMAL SOLUTION FOUND') GO TO 881
        WRITE(*,882)J
882  FORMAT('    SOLUCAO INFATIVEL PARA O PERIODO J = ',I2)
        PAUSE
881  CONTINUE
        CLOSE(UNIT=31)
C
C*****
C    CALCULO DA ABERTURA DAS VALVULAS PARA CONTROLE DAS VAZoes
C*****
C
        Q=VET4(1)
        DP=DP(1)
        D=VET3(1)
        CALL VALV(DP,Q,D,X)
        X1=X
        Q=VET4(5)
        DP=DP(2)
        D=VET3(5)
        CALL VALV(DP,Q,D,X)
        X2=X
C
C*****
C    GRAVACAO E ORGANIZACAO DOS RESULTADOS DO PROCESSAMENTO
C*****
C
        IF (J.NE.1) GO TO 2501
        WRITE(25,2600)
2600  FORMAT(3X,'T',4X,'HR(1)',3X,'HRN(1)',3X,'HR(2)',2X,'HRN(2)',5X,

```

```

1 'QT(2)',5X,'QT(3)',5X,'QT(4)',5X,'QT(5)',5X,'QT(6)',5X,'QT(7)',5X,
1 'QT(8)',5X,'QT(9)',4X,'QT(10)',4X,'QT(13)',4X,'QT(15)',4X,
1 'QT(16)',5X,'QV(1)',5X,'QV(2)',4X,'HMB(1)',2X,' N',4X,'%AV1'
1,4X,'%AV2')
2501 CONTINUE
WRITE(25,2500)J,HR(1),HRN(1),HR(2),HRN(2),VET4N(1),VET4N(2),
1VET4N(3),VET4N(4),VET4N(5),VET4N(6),VET4N(7),VET4N(8),VET4N(9),
1VET4N(10),VET4N(11),VET4N(12),QV(1),QV(2),HMB(1),N,X1,X2
2500 FORMAT(2X,I2,2X,F7.3,2X,F7.3,1X,F7.3,1X,F7.3,2X,F8.5,2X,F8.5,2X,
1F8.5,2X,F8.5,2X,F8.5,2X,F8.5,2X,F8.5,2X,F8.5,2X,F8.5,2X,F8.5,2X,
1F8.5,2X,F8.5,2X,F8.5,2X,F8.5,3X,F6.3,1X,I5,2X,F5.2,3X,F5.2)
IF (J.NE.1) GO TO 2502
WRITE(26,2602)
2602 FORMAT(4X,'PD(3)',5X,'PD(4)',5X,'PD(5)',5X,'PD(6)',5X,'PD(8)',
*5X,'PD(9)',5X,'PD(10)',4X,'PD(11)',4X,'PD(14)',4X,'PD(15)')
2502 CONTINUE
WRITE(26,2601)(H(I),I=1,10)
2601 FORMAT(10(3X,F7.3))
IF (J.NE.1) GO TO 9502
WRITE(27,9602)
9602 FORMAT(5X,'WQ(5)',5X,'WQ(6)',4X,'WQ(11)',4X,'WQ(14)',4X,'WQ(15)')
9502 CONTINUE
WRITE(27,9601)(WQ(I),I=1,5)
9601 FORMAT(5(3X,F7.3))
IF (J.NE.1) GO TO 9592
WRITE(28,9612)
9612 FORMAT(5X,'XHN(3)',5X,'XHN(4)',5X,'XHN(5)',5X,'XHN(6)',5X,'XHN(8)
1',5X,'XHN(9)',4X,'XHN(10)',4X,'XHN(11)',4X,'XHN(14)',4X,'XNH(15)')
9592 CONTINUE
WRITE(28,9611)(XHN(I),I=1,10)
9611 FORMAT(10(4X,F7.3))
C
C*****
C ATUALIZACAO DE VALORES PARA O PROXIMO INTERVALO
C*****
C
HR(1)=HRN(1)
HR(2)=HRN(2)
HMBS(1)=2*HMB(1)
HMBI(1)=0.1*HMB(1)
1009 CONTINUE
CLOSE(UNIT=25)
CLOSE(UNIT=26)
CLOSE(UNIT=27)
CLOSE(UNIT=28)
WRITE(*,5978)K
5978 FORMAT(' NUMERO DE VEZES QUE A ROTINA DE OTIMIZACAO FOI EXECUTAD
*A:',I3)
STOP
END
C
C*****
C FIM
C*****
C

```

ARQUIVO: EXEOTM.FOR

```

SUBROUTINE EXEOTM

    INCLUDE 'FLIB.FD'

    INTEGER*4 RESULT
    CHARACTER*80 ARGS
    RESULT = RUNQQ('PROGPL', ARGS)

    RETURN
END

```

ARQUIVO: VALV.FOR

```

SUBROUTINE VALV(DP,Q,D,X)

    REAL Z1,Z2,X,Q,DP,K

C***** 2.014982 E O VALOR CALCULADO DE D, G, PI

    K=(DP*D*D*D*D*12.1026)/(Q*Q)

C***** A CURVA EXTRAIDA DE LEVIN FOI DIVIDIDA EM QUATRO PARTES
C      PARA UMA MELHOR REPRESENTACAO DA MESMA
C
    IF ((K.GT.(0.16)).AND.(K.LE.(0.56))) THEN
        Z1=1.017680
        Z2=0.018136
    ENDIF
    IF ((K.GT.(0.56)).AND.(K.LE.(3.8))) THEN
        Z1=1.688578
        Z2=0.027720
    ENDIF
    IF ((K.GT.(3.8)).AND.(K.LE.(25))) THEN
        Z1=2.216096
        Z2=0.040908
    ENDIF
    IF ((K.GT.(25)).AND.(K.LE.(100))) THEN
        Z1=2.602060
        Z2=0.060206
    ENDIF

    X=(Z1-(ALOG10(K)))/Z2

    RETURN
END

```

APÊNDICE - D

MODELAGEM MATEMÁTICA DO “BOOSTER” CANGAÍBA

O “booster” Cangaíba é modelado neste trabalho para operar com rotação variável. A modelagem foi montada a partir de pares de pontos característicos conhecidos do “booster” para a rotação normal de operação (NN = 900 rpm).

Tabela 1.A4 – Pontos da curva manométrica do “booster” Cangaíba

H (m)	Q (l/s)
41,0	0
40,0	8
36,0	400
32,0	720
28,0	1000
19,0	1480
14,0	1680
8,0	1880

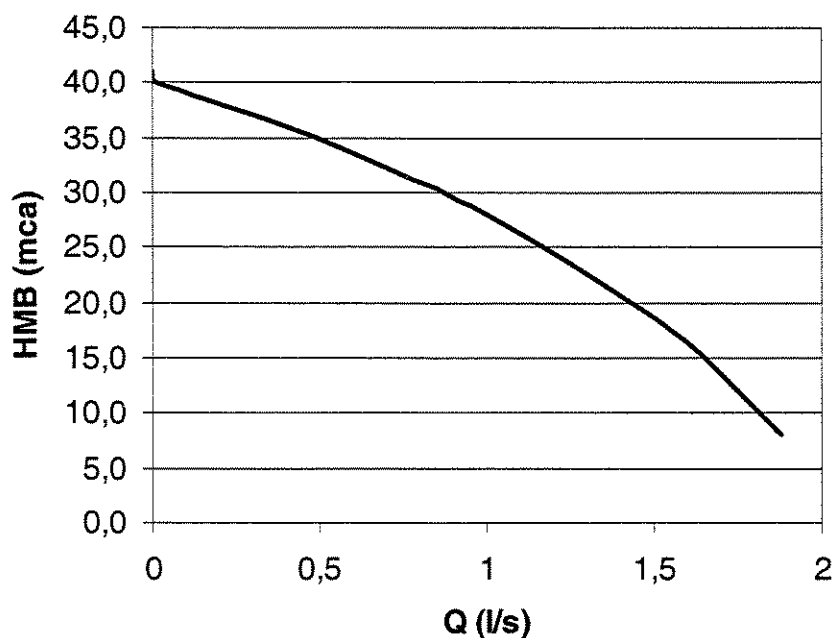


Figura 1.A4 – Curva manométrica do “booster” Cangaíba

De posse da curva manométrica (Figura 1.A4) é possível identificar os parâmetros:

$$\begin{aligned}
 H_S &= 41.0 \text{ mca}; \\
 H_R &= 22.5 \text{ mca}; \\
 H_T &= 17.5 \text{ mca}; \\
 Q_R &= 1.300 \text{ m}^3/\text{s}; \\
 Q_T &= 1.550 \text{ m}^3/\text{s}.
 \end{aligned}$$

Para a montagem do polinômio do 2º grau da curva do “booster” (equação 4.6) é preciso identificar os valores das constantes C_0 , C_1 , C_2 que são calculadas pelas equações 4.7, 4.8 e 4.9. A seguir apresenta-se os valores das constantes calculadas:

$$\begin{aligned}
 C_0 &= 41.0; \\
 C_1 &= -9.392; \\
 C_2 &= -3.722.
 \end{aligned}$$

A seguir repete-se a apresentação da equação 4.17. Tal equação fornece a rotação de operação do “booster” para uma dada vazão e uma dada altura manométrica.

$$n = \frac{n_n}{2 \cdot C_0} \left((-C_1 \cdot Q_x) + \sqrt{(-C_1 \cdot Q_x)^2 - (4 \cdot C_0 \cdot C_2 \cdot Q_x^2) + (4 \cdot C_0 \cdot H_x)} \right)$$

Na Tabela 2.A4 apresenta-se para alguns exemplos os valores operacionais de rotação do “booster”.

Tabela 2.A4 – Valores operacionais de rotação do “booster”

Vazão - Q_x (m³/s)	Altura manométrica – HMB (mca)	Rotação do “booster” (rpm)
1.500	5.00	671
2.000	4.00	821
1.250	20.00	844