

Klebber Teodomiro Martins Formiga

OTIMIZAÇÃO MULTI OBJETIVO DE PROJETOS DE REDES
DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo como parte dos requisitos para obtenção do Título de Doutor em Hidráulica e Saneamento.

Orientador: Prof. Titular Fazal Hussain Chaudhry

São Carlos

2005

À minha esposa Cibelle pelo
companheirismo e solidariedade.
Aos meus pais, Teodomiro e
Jovina, pelo amor irrestrito e
exemplo de vida a ser seguido.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida.

Aos meus pais pelos valores essenciais à minha educação.

Às minhas irmãs Kathia e Kassia pelo eterno carinho demonstrado para comigo.

A minha esposa Cibelle por estar sempre ao meu lado, me incentivando a seguir em frente e fornecendo todo o sustentáculo, sem o qual não seria possível concluir este trabalho.

Ao Prof. Fazal pela orientação, conselhos e calor humano dispensado, mesmo antes de me conhecer pessoalmente.

Aos professores, Luisa Fernanda, Heber Pimentel e Rodrigo Porto, essenciais na minha formação científica.

Aos colegas do LABSIN, Adelena Maia, Alexandre Kepler, Andréa Lira, Fernando Braga, José Alamy, José Tosta, Luciane Gelesky, Peter Cheung e Tinil pelas discussões, companhia e auxílio durante todo o período que estive em São Carlos.

Aos funcionários do Departamento de Hidráulica, Sá, Pavi, Rose e André.

Aos colegas da ANA, Ana Carolina, Anna Paola, Marcio, Rafael Duarte e Viviane, pelo apoio dado durante minha estada em Brasília.

À FAPESP pelo suporte financeiro recebido na forma de bolsa e reserva técnica.

Ao Dr. Jaskiewicz pela disponibilização e auxílio fornecido no uso da Biblioteca MOMHLib++.

A todos aqueles que contribuíram direta e indiretamente para a conclusão desta tese.

RESUMO

FORMIGA, K. T. M. F (2005) *Otimização Multiobjetivo de Projetos de Redes de Distribuição de Água*. São Carlos, 2005 276p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

O dimensionamento otimizado de sistemas de distribuição de águas tem originado centenas de trabalhos científicos nas últimas quatro décadas. Vários pesquisadores têm buscado encontrar uma metodologia capaz de dimensionar essas redes considerando diversos aspectos e incertezas características desse tipo de projeto. No entanto, os resultados das da maioria das metodologias desenvolvidas não podem ser aplicados na prática. O objetivo deste trabalho é elaborar uma metodologia de dimensionamento de redes de distribuição de água considerando um enfoque multiobjetivo. A metodologia desenvolvida considera três aspectos referentes ao projeto desses sistemas: custo; confiabilidade e perdas por vazamentos. Para tanto, empregou-se um método de otimização multiobjetivo baseado em algoritmos genéticos para a geração do conjunto de soluções não-dominadas e um método multicriterial para escolha da alternativa final. Para representar os objetivos do problema, foram testadas nove funções: custo, vazamentos, entropia, resiliência, tolerância à falha, expansibilidade, efeito do envelhecimento e resilientropia, sendo que sete destas são específicas para a representação da confiabilidade. Para se avaliar as alternativas geradas foi desenvolvido um modelo de análise hidráulica que fosse capaz de trabalhar com vazamentos e com demandas dependente da pressão. Os métodos escolhidos foram o *Híbrido* de Nielsen e o *Gradiente*. Das funções testadas, a resilientropia, proposta originalmente neste trabalho, foi a que melhor se ajustou ao conceito formal de confiabilidade, representado pela função *tolerância*. Os resultados encontrados pela metodologia mostraram-se promissores, uma vez esta foi capaz de encontrar redes eficientes ao final das simulações.

Palavras-chave: dimensionamento de redes de distribuição de água, otimização multiobjetivo, algoritmos evolucionários, confiabilidade de sistemas.

ABSTRACT

FORMIGA, K. T. M. F (2005) Mutiobjective Optimization of Water Distribution Network Projects. São Carlos, 2005 276p. PhD Thesis – São Carlos School of Engineering, University of São Paulo.

The topic “Optimized design of water distribution systems” has generated hundreds of scientific publications in the last four decades. Several researchers have searched for a technology which would take into account a variety of aspects and uncertainties innate to the design of such networks. However, the results of most methodologies developed are not practical. The objective of this work is to develop a methodology for water distribution systems design that has a multi-objective focus. The methodology developed focuses in three aspects of the design of such systems: cost, reliability and losses by leaking. A multiobjective optimization method based on generic algorithms, generating a set of non-defined solutions, and a multi-criteria method for choosing the final alternative, was employed. Nine functions representing the objectives of the problem (method) were tested: cost, leakages, entropy, resilience, failure tolerance, expansibility, aging effect and resilientropy, seven of which are specific to representing reliability. In order to evaluate the generated alternatives, a hydraulic analysis model, that could handle leakages and pressure dependent demands, was developed. The chosen methods were Nielsen's *Hybrid*, and *the Gradient*. Of all tested functions, resilientropy, originally proposed in this work, proved to be the one best adjusted to the formal concept of reliability, represented by the *tolerance* function. The results obtained by this methodology are promising, as they produced efficient distribution networks at the end of the simulations performed.

Key words: design of water distribution networks, multiobjective optimization, evolutionary algorithms, systems reliability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Esquema da distribuição dos segmentos de trechos do método de Jacoby	15
Figura 2.2 - Função densidade de probabilidade exponencial mostrando a confiabilidade e o risco	29
Figura 2.3 - Simplificações para tubos em série e paralelo (Adaptada de WAGNER, SHAMIR e MARKS, 1998a).	42
Figura 2.4 - Rede exemplo de cinco trechos	44
Figura 2.5 - Caminhos mínimos da rede de cinco trechos da Figura 2.4 (Adaptada de TUNG, MAYS e CULLINANE, 1989)	44
Figura 2.6 - Mínimos cortes da rede de cinco trechos da Figura 2.4 (Adaptada de TUNG, MAYS e CULLINANE, 1989)	45
Figura 2.7 - Relação entre a Vazamento e Pressão (JOWITT e XU, 1990)	65
Figura 3.1 Representação dos espaços das variáveis de decisão e dos objetivos	73
Figura 3.2 Vetores objetivo ideal e nadir no espaço objetivo de duas dimensões	74
Figura 3.3 Método dos pesos para um problema de dois objetivos	77
Figura 3.4 Representação do método dos pesos em um problema não convexo	78
Figura 3.5 Representação do método das restrições- ϵ	79
Figura 3.6 Definição do ranking no MOGA	88
Figura 3.7 Ordenação no método NSGA-II	91
Figura 3.8 Esquema da definição de distância de multidão	92
Figura 3.9 Esquema do método NSGA-II	93
Figura 3.10 Definição da aptidão no método SPEA	95
Figura 3.11 Esquema do algoritmo de corte do SPEA	96
Figura 3.12 - Critério de concordância do método ELECTRE III	100
Figura 3.13 - Critério de discordância do método ELECTRE III	100
Figura 3.14 - Funções de Preferência do método PROMETHEE	103
Figura 4.1 - Relação entre a entropia normalizada e a razão das vazões de dois trechos ($q_2 \geq q_1$)	114
Figura 4.2 - Exemplo do comportamento esperado para os limites superior e inferior da confiabilidade	118
Figura 4.3 – Exemplo de uma solução com codificação inteira	121
Figura 4.4 - Processo utilizado pelo Operador de Recombinação Naive	123
Figura 4.5 - Esquema do Operador de Recombinação Uniforme	124

Figura 4.6 - Diferentes tipos de frentes que podem ser obtidas por métodos multiobjetivos	125
Figura 4.7 - Definição da Métrica S	127
Figura 4.8 - Esquema de uma válvula redutora de pressão inativa	136
Figura 4.9. Esquema de uma válvula redutora de pressão fechada	137
Figura 4.10. Esquema de uma válvula redutora de pressão ativa	137
Figura 4.11 - Visualização do preenchimento de uma matriz A de Stieltjes com dimensões 400x400, da matriz LT obtida através da Fatorização de Cholesky e da matriz LT obtida pela Fatorização Incompleta de Cholesky com a indicação do número de elementos não zero (nz) da matriz	143
Figura 4.12 - Layout da rede Teste I	148
Figura 4.13 - Esquema da rede “Dois Anéis”	149
Figura 4.14 - Distribuição dos trechos na rede do Bessa	152
Figura 4.15 - Sistema RF1 original	159
Figura 4.16 - Distribuição dos nós no sistema RF1, com esqueletização	161
Figura 4.17 - Distribuição dos trechos no sistema RF1, com esqueletização	161
Figura 5.1 - Esquema das redes utilizadas para comparação	167
Figura 5.2 - Visualização do preenchimento da matriz A de Stieltjes com dimensões 400x400 para os casos de disposição regular (a) e irregular (b) dos nós.	168
Figura 5.3 - Tempo médio X número de variáveis para redes com malha regular	169
Figura 5.4 - Tempo médio x número de variáveis para os sistemas com malha irregular	172
Figura 5.5 - Valores da Métrica C(A,B) para as diferentes configurações do método NSGAI, considerando 2, 3 e 4 objetivos.	176
Figura 5.6 - Valores da Métrica C(A,B) para as diferentes configurações do método SPEA , considerando 2, 3 e 4 objetivos	177
Figura 5.7 - Valores da Métrica C(A,B) para as diferentes configurações dos método NSGAI e SPEA, considerando 2, 3 e 4 objetivos.	179
Figura 5.8 - Curva de demanda diária utilizada para a rede Dois Anéis	181
Figura 5.9 - Scatter-matrix do conjunto de soluções não dominadas gerado a partir de um conjunto inicial de 200 indivíduos após 500 gerações para o problema da rede Dois Anéis, considerando os objetivos da Simulação 1	182
Figura 5.10 - Evolução dos valores da Métrica S para as soluções geradas considerando os objetivos da Simulação 1 da rede Dois Anéis	183
Figura 5.11 - Scatter-matrix do conjunto de soluções não dominadas gerados a partir de um conjunto inicial de 200 indivíduos após 500 gerações para o problema da rede Dois Anéis, considerando os objetivos da Simulação 4	185

Figura 5.12 - Evolução dos valores da Métrica S para as soluções geradas considerando os objetivos da Simulação 4 da rede Dois Anéis	186
Figura 5.13 - Scatter-matrix dos valores das funções objetivo para as soluções geradas considerando os objetivos das Simulações 1, 2 e 3 da rede Dois Anéis	188
Figura 5.14 - Scatter-matrix dos valores das funções objetivo para as soluções geradas considerando os objetivos das Simulações 4, 5 e 6 da rede Dois Anéis	190
Figura 5.15 - Visualização da distribuição das cargas hidráulicas (em mH ₂ O) e das vazões (l/s) para algumas configurações de diâmetros encontradas nas Simulações 1, 2 e 3 da rede Dois Anéis	194
Figura 5.16 - Visualização da distribuição das cargas hidráulicas (em mH ₂ O) e das vazões (l/s) para algumas configurações de diâmetros encontradas nas Simulações 4, 5 e 6 da rede Dois Anéis	196
Figura 5.17 - Scatter-matrix dos valores das funções objetivo para as soluções geradas considerando os objetivos das Simulações 1, 2 e 3 da rede do Bessa	198
Figura 5.18 - Evolução dos valores da Métrica S para as soluções geradas considerando os objetivos da Simulação 1 da rede do Bessa	199
Figura 5.19 - Scatter-matrix dos valores das funções objetivo para as soluções geradas considerando os objetivos das Simulações 4, 5 e 6 da rede do Bessa	200
Figura 5.20 - Evolução dos valores da Métrica S para as soluções geradas considerando os objetivos da Simulação 1 da rede do Bessa	201
Figura 5.23 - Scatter-matrix dos valores das funções objetivo para as soluções geradas considerando os objetivos das Simulações 1, 2 e 3 da rede RF1	209
Figura 5.24 - Evolução dos valores da Métrica S para as soluções geradas considerando os objetivos da Simulação 1 da rede RF1	210
Figura 5.25 - Scatter-matrix dos valores das funções objetivo para as soluções geradas considerando os objetivos das Simulações 1, 2 e 3 da rede RF1	212
Figura 5.26 - Evolução dos valores da Métrica S para as soluções geradas considerando os objetivos da Simulação 1 da rede RF1	213
Figura 5.27 - Scatter-matrix dos valores das funções objetivo para as soluções geradas considerando os objetivos das Simulações 1, 2 e 3 da rede RF1 com locação de válvulas	217
Figura 5.28 - Evolução dos valores da Métrica S para as soluções geradas considerando os objetivos da Simulação 1 da rede RF1 com locação de válvulas	218

Figura A.1 - Box-plots dos valores da Métrica S de diferentes configurações utilizando o método NSGAIi considerando 2, 3 e 4 objetivos.	243
Figura A.2 - Box-plots dos valores da Métrica S de diferentes configurações utilizando o método SPEA considerando 2, 3 e 4 objetivos.	243
Figura A.3 - Box-plots dos valores do espaçamento das várias configurações, para o método NSGAIi considerando 2, 3 e 4 objetivos.	244
Figura A.4- Box-plots dos valores do espaçamento das várias configurações, para o método SPEA considerando 2, 3 e 4 objetivos.	244
Figura A.5 - Evolução dos valores da Métrica S para diferentes configurações do método NSGAIi para considerando dois objetivos	245
Figura A.6 - Evolução dos valores da Métrica S para diferentes configurações do método SPEA para considerando dois objetivos	245
Figura A.7 - Evolução dos valores da Métrica S para diferentes configurações do método NSGAIi para considerando três objetivos	246
Figura A.8 - Evolução dos valores da Métrica S para diferentes configurações do método SPEA para considerando três objetivos	246
Figura A.9 - Evolução dos valores da Métrica S para diferentes configurações do método NSGAIi para considerando quatro objetivos	247
Figura A.10 - Evolução dos valores da Métrica S para diferentes configurações do método SPEA para considerando quatro objetivos	247
Figura A.11 - Distribuição das vazões nos trechos (l/s) da rede RF1 considerando a alternativa 139 obtida para as Simulações 1, 2 e 3.	263
Figura A.12 - Distribuição das vazões nos trechos (l/s) da rede RF1 considerando a alternativa 184 obtida para as Simulações 1, 2 e 3.	264
Figura A.13 - Distribuição das vazões nos trechos (l/s) da rede RF1 considerando a alternativa 199 obtida para as Simulações 1, 2 e 3.	265
Figura A.14 - Distribuição das vazões nos trechos (l/s) da rede RF1 considerando a alternativa 1 obtida para as Simulações 4, 5 e 6.	266
Figura A.15 - Distribuição das vazões nos trechos (l/s) da rede RF1 considerando a alternativa 173 obtida para as Simulações 4, 5 e 6.	267
Figura A.16 - Distribuição das vazões nos trechos (l/s) da rede RF1 considerando a alternativa 193 obtida para as Simulações 4, 5 e 6.	268
Figura A.17 - Distribuição das vazões nos trechos (l/s) da rede RF1 considerando a alternativa 236 obtida para as Simulações 4, 5 e 6.	269
Figura A.18 - Distribuição das vazões nos trechos (l/s) da rede RF1 com locação de válvulas, considerando a alternativa 1 obtida para as Simulações 4, 5 e 6.	273

Figura A.19 - Distribuição das vazões nos trechos (l/s) da rede RF1 com locação de válvulas, considerando a alternativa 227 obtida para as Simulações 4, 5 e 6.	274
Figura A.20 - Distribuição das vazões nos trechos (l/s) da rede RF1 com locação de válvulas, considerando a alternativa 236 obtida para as Simulações 4, 5 e 6.	275
Figura A.21- Distribuição das vazões nos trechos (l/s) da rede RF1 com locação de válvulas, considerando a alternativa 251 obtida para as Simulações 4, 5 e 6.	276

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Perdas Físicas por subsistemas (adaptada de CONEJO, LOPES e MARCKA 1999a)	62
Tabela 4.1 - Dados referentes aos nós da Rede I	147
Tabela 4.2 - Dados referentes aos trechos da Rede I	147
Tabela 4.3 - Dados referentes aos nós da “Dois Anéis”	150
Tabela 4.4 - Dados referentes aos trechos da “Dois Anéis”	150
Tabela 4.5 - Custo unitário da tubulação em Unidades Monetárias para a rede “Dois Anéis”	150
Tabela 4.6 - Dados referentes aos nós da rede do Bessa	153
Tabela 4.7 - Dados referentes aos trechos da rede do Bessa	154
Tabela 4.8 - Custo unitário da tubulação em Unidades Monetárias para a rede do Bessa	154
Tabela 4.9 Dados referentes aos nós da rede do RF1	157
Tabela 4.10 Dados referentes aos trechos da rede do RF1	158
Tabela 5.1 - Configurações estudadas da Rede I	164
Tabela 5.2 - Número de iterações dos métodos para diferentes configurações da Rede I	164
Tabela 5.3 - Cargas hidráulicas nos nós (em mH ₂ O) para as diferentes configurações da Rede I	165
Tabela 5.4 - Vazões nos trechos (em m ³ /s) para as diferentes configurações da Rede I	166
Tabela 5.5 - Tempo médio (em segundos) de resolução dos sistemas de equações de redes com disposição regular dos nós utilizando diferentes métodos	169
Tabela 5.6 - Resultado da análise de regressão (potencia) para as variáveis tempo x tamanho dos sistemas com malha regular	170
Tabela 5.7 - Pontos de interseção (número de variáveis), para sistemas com malha regular, das curvas de regressão dos diversos métodos.	171
Tabela 5.8 - Números de condição das matrizes, de elementos não zeros, , e de iterações requeridos pelos diferentes métodos de Gradiente Conjugado para sistemas com disposição regular dos nós	171
Tabela 5.9 - Tempo médio (em segundos) de resolução dos sistemas de equações com disposição irregular da malha utilizando-se diferentes métodos.	172

Tabela 5.10 - Resultado da análise de regressão (potencia) para as variáveis tempo x tamanho do sistema com disposição irregular de nós	173
Tabela 5.11 - Pontos de interseção (número de variáveis), para sistemas com malha irregular, das curvas de regressão dos métodos estudados	173
Tabela 5.12 - Números de condição das matrizes, de elementos não zeros, e de iterações requeridos pelos diferentes métodos de Gradiente Conjugado para sistemas com disposição irregular dos nós	173
Tabela 5.13 - Codificação das combinações empregadas na análise do método multiobjetivo	175
Tabela 5.14 - Esquema das simulações efetuadas considerando diferentes funções objetivo	180
Tabela 5.15 - Resumo dos valores das funções objetivo para as soluções geradas considerando os objetivos da Simulação 1 da rede Dois Anéis	183
Tabela 5.16 - Resumo dos valores das funções objetivo para as soluções geradas considerando os objetivos da Simulação 4 da rede Dois Anéis	185
Tabela 5.17 - Resumo dos valores das funções objetivo para as soluções geradas considerando os objetivos das Simulações 1, 2 e 3 da rede Dois Anéis	187
Tabela 5.18 - Coeficiente de correlação entre as funções objetivo relacionadas à confiabilidade das soluções geradas considerando os objetivos das Simulações 1, 2 e 3 para a rede Dois Anéis	187
Tabela 5.19 - Resumo dos valores das funções objetivo para as soluções geradas considerando os objetivos das Simulações 4, 5 e 6 da rede Dois Anéis	189
Tabela 5.20 - Coeficiente de correlação entre as diversas funções objetivo das soluções geradas considerando os objetivos das Simulações 4, 5 e 6 para a rede Dois Anéis	189
Tabela 5.21 - Pesos das funções objetivo empregadas nos métodos ELECTRE III e PROMETHEE para as diversas simulações da rede Dois Anéis	192
Tabela 5.22 - Resumo dos valores das funções objetivo para as soluções geradas considerando os objetivos das Simulações 1, 2 e 3 da rede do Bessa	198
Tabela 5.23 - Coeficiente de correlação entre funções objetivo relacionadas à confiabilidade das soluções geradas considerando os objetivos das Simulações 4, 5 e 6 para a rede do Bessa	198
Tabela 5.24 - Resumo dos valores das funções objetivo para as soluções geradas considerando os objetivos das Simulações 4, 5 e 6 da rede do Bessa	201

Tabela 5.25 - Coeficiente de correlação entre funções objetivo relacionadas à confiabilidade das soluções geradas considerando os objetivos das Simulações 4, 5 e 6 para a rede do Bessa	201
Tabela 5.26 - Resumo dos valores das funções objetivo para as soluções geradas considerando os objetivos das Simulações 1, 2 e 3 da rede RF1	210
Tabela 5.27 - Coeficiente de correlação entre funções objetivo relacionadas à confiabilidade das soluções geradas considerando os objetivos das Simulações 1, 2 e 3 da rede RF1	210
Tabela 5.28 - Resumo dos valores das funções objetivo para as soluções geradas considerando os objetivos das Simulações 1, 2 e 3 da rede RF1	212
Tabela 5.29 - Coeficiente de correlação entre funções objetivo relacionadas à confiabilidade das soluções geradas considerando os objetivos das Simulações 1, 2 e 3 da rede RF1	212
Tabela 5.30 - Resumo dos valores das funções objetivo para as soluções geradas considerando os objetivos das Simulações 1, 2 e 3 da rede RF1 com locação de válvulas	217
Tabela 5.31 - Coeficiente de correlação entre funções objetivo relacionadas à confiabilidade das soluções geradas considerando os objetivos das Simulações 1, 2 e 3 da rede RF1 com locação de válvulas	217
Tabela 5.32 - Pesos das funções objetivo empregadas nos métodos ELECTRE III e PROMETHEE para as diversas simulações da RF1 com locação de válvulas	218
Tabela A.1 - Valores médios da Métrica C(A,B) para as diferentes configurações do método NSGAI considerando dois objetivos	241
Tabela A.2 - Valores médios da Métrica C(A,B) para as diferentes configurações do método NSGAI considerando três objetivos	241
Tabela A.3 - Valores médios da Métrica C(A,B) para as diferentes configurações do método NSGAI considerando quatro objetivos	241
Tabela A.4 - Valores médios da Métrica C(A,B) para as diferentes configurações do método SPEA considerando dois objetivos	242
Tabela A.5 - Valores médios da Métrica C(A,B) para as diferentes configurações do método SPEA considerando três objetivos	242
Tabela A.6 - Valores médios da Métrica C(A,B) para as diferentes configurações do método SPEA considerando quatro objetivos	242

Tabela A.7 - Resultado da aplicação do método ELECTRE III aos dados gerados para a rede Dois Anéis utilizando os critérios da Simulação 1	249
Tabela A.8 - Resultado da aplicação do método PROMETHEE aos dados gerados para a rede Dois Anéis utilizando os critérios da Simulação 1	249
Tabela A.9 - Resultado da aplicação do método ELECTRE III aos dados gerados para a rede Dois Anéis utilizando os critérios da Simulação 2	249
Tabela A.10 - Resultado da aplicação do método PROMETHEE aos dados gerados para a rede Dois Anéis utilizando os critérios da Simulação 2	250
Tabela A.11 - Resultado da aplicação do método ELECTRE III aos dados gerados para a rede Dois Anéis utilizando os critérios da Simulação 3	250
Tabela A.12 - Resultado da aplicação do método PROMETHEE aos dados gerados para a rede Dois Anéis utilizando os critérios da Simulação 3	250
Tabela A.13 - Resultado da aplicação do método ELECTRE III aos dados gerados para a rede Dois Anéis utilizando os critérios da Simulação 4	251
Tabela A.14 - Resultado da aplicação do método PROMETHEE aos dados gerados para a rede Dois Anéis utilizando os critérios da Simulação 4	251
Tabela A.15 - Resultado da aplicação do método ELECTRE III aos dados gerados para a rede Dois Anéis utilizando os critérios da Simulação 5	251
Tabela A.16 - Resultado da aplicação do método PROMETHEE aos dados gerados para a rede Dois Anéis utilizando os critérios da Simulação 5	252
Tabela A.17 - Resultado da aplicação do método ELECTRE III aos dados gerados para a rede Dois Anéis utilizando os critérios da Simulação 6	252
Tabela A.18 - Resultado da aplicação do método PROMETHEE aos dados gerados para a rede Dois Anéis utilizando os critérios da Simulação 6	252
Tabela A.19 - Resultado da aplicação do método ELECTRE III aos dados gerados para a rede do Bessa utilizando os critérios da Simulação 1	254
Tabela A.20 - Resultado da aplicação do método PROMETHEE aos dados gerados para a rede do Bessa utilizando os critérios da Simulação 1	254
Tabela A.21 - Resultado da aplicação do método ELECTRE III aos dados gerados para a rede do Bessa utilizando os critérios da Simulação 2	254
Tabela A.22 - Resultado da aplicação do método PROMETHEE aos dados gerados para a rede do Bessa utilizando os critérios da Simulação 2	255
Tabela A.23 - Resultado da aplicação do método ELECTRE III aos dados gerados para a rede do Bessa utilizando os critérios da Simulação 3	255

Tabela A.24 - Resultado da aplicação do método PROMETHEE aos dados gerados para a rede do Bessa utilizando os critérios da Simulação 3	255
Tabela A.25 - Resultado da aplicação do método ELECTRE III aos dados gerados para a rede do Bessa utilizando os critérios da Simulação 4	256
Tabela A.26 - Resultado da aplicação do método PROMETHEE aos dados gerados para a rede do Bessa utilizando os critérios da Simulação 4	256
Tabela A.27 - Resultado da aplicação do método ELECTRE III aos dados gerados para a rede do Bessa utilizando os critérios da Simulação 5	256
Tabela A.28 - Resultado da aplicação do método PROMETHEE aos dados gerados para a rede do Bessa utilizando os critérios da Simulação 5	257
Tabela A.29 - Resultado da aplicação do método ELECTRE III aos dados gerados para a rede do Bessa utilizando os critérios da Simulação 6	257
Tabela A.30 - Resultado da aplicação do método PROMETHEE aos dados gerados para a rede do Bessa utilizando os critérios da Simulação 6	257
Tabela A.31 - Resultado da aplicação do método ELECTRE III aos dados gerados para a rede RF1 utilizando os critérios da Simulação 1	259
Tabela A.32 - Resultado da aplicação do método PROMETHEE aos dados gerados para a rede RF1 utilizando os critérios da Simulação 1	259
Tabela A.33 - Resultado da aplicação do método ELECTRE III aos dados gerados para a rede RF1 utilizando os critérios da Simulação 2	259
Tabela A.34 - Resultado da aplicação do método PROMETHEE aos dados gerados para a rede RF1 utilizando os critérios da Simulação 2	260
Tabela A.35 - Resultado da aplicação do método ELECTRE III aos dados gerados para a rede RF1 utilizando os critérios da Simulação 3	260
Tabela A.36 - Resultado da aplicação do método PROMETHEE aos dados gerados para a rede RF1 utilizando os critérios da Simulação 3	260
Tabela A.37 - Resultado da aplicação do método ELECTRE III aos dados gerados para a rede RF1 utilizando os critérios da Simulação 4	261
Tabela A.38 - Resultado da aplicação do método PROMETHEE aos dados gerados para a rede RF1 utilizando os critérios da Simulação 4	261
Tabela A.39 - Resultado da aplicação do método ELECTRE III aos dados gerados para a rede RF1 utilizando os critérios da Simulação 5	261
Tabela A.40 - Resultado da aplicação do método PROMETHEE aos dados gerados para a rede RF1 utilizando os critérios da Simulação 5	262

Tabela A.41 - Resultado da aplicação do método ELECTRE III aos dados gerados para a rede RF1 utilizando os critérios da Simulação 6	262
Tabela A.42 - Resultado da aplicação do método PROMETHEE aos dados gerados para a rede RF1 utilizando os critérios da Simulação 6	262
Tabela A.43 - Resultado da aplicação do método ELECTRE III aos dados gerados para a rede RF1 utilizando os critérios da Simulação 4	271
Tabela A.44 - Resultado da aplicação do método PROMETHEE aos dados gerados para a rede RF1 utilizando os critérios da Simulação 4	271
Tabela A.45 - Resultado da aplicação do método ELECTRE III aos dados gerados para a rede RF1 utilizando os critérios da Simulação 5	271
Tabela A.46 - Resultado da aplicação do método PROMETHEE aos dados gerados para a rede RF1 utilizando os critérios da Simulação 5	272
Tabela A.47 - Resultado da aplicação do método ELECTRE III aos dados gerados para a rede RF1 utilizando os critérios da Simulação 6	272
Tabela A.48 - Resultado da aplicação do método PROMETHEE aos dados gerados para a rede RF1 utilizando os critérios da Simulação 6	272

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACO	Ant Colony Optimization
AE	Algoritmo Evolucionário
AG	Algoritmo Genético
AM	Algoritmo Memético
AHP	Analytic Hierarchical Process
BLX- α	Blend Crossover
CAGEPA	Companhia de Águas e Esgotos da Paraíba
CODASID	Concordance and Discordance Analyses by Similarity to Ideal Designs
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
ELECTRE	ELimination Et Choix Tradusuant la REalité
EMO	
EMOEA	Elitist Multi-Objective Evolutionary Algorithm
GANET	Genetic Algorithm Network
GC	Gradiente Conjugado
GFO	gradiente da função objetivo
GPL	gradiente de programação linear
GRG	Generalized Reduced Gradient
GRG2	Generalized Reduced Gradient Second Order
MILP	Mixed Integer Linear Program
MLT	Método da Teoria Linear
MNR	Método Newton-Ranphson
MOEA	MultiObjective Evolutionary Algorithm
MOGA	MultiObjective Genetic Algorithm
MOGLS	MultiObjective Genetic Local Search
MOSES	Multiobjective Optimization of Systems in the Engineering Sciences
MOSGA	MultiObjective Struggle Genetic Algorithm
NPGA	Niched Pareto Genetic Algorithm
NSGA	Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm
NSGA-II	Elitist Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm
OG	Otimização Global
PAES	Pareto-Archived Evolution Strategy
PO	Pesquisa Operacional

PD	Programação Dinâmica
PL	Programação Linear
PNL	Programação Não Linear
PROMETHEE	Preference Ranking Organization METHODS for Enrichment Evaluations
RDA	rede de distribuição de água
SA	Simulated Annealing
SDA	sistema de distribuição de água
SFLA	Shuffled Frog Leaping Algorithm
SMART	Simple Multi Attribute Rating Technique
SMC	Simulação Monte Carlo
SOR	Relaxação Sucessiva
SPEA	Strength Pareto Evolutionary Algorithm
SPEA 2	Improved Strength Pareto Evolutionary Algorithm
SQP	Sequential Quadratic Programming
SSOR	Relaxação Sucessiva Simétrica
TOPSIS	Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution
UFPB	Universidade Federal da Paraíba
USP	Universidade de São Paulo
VEGA	Vector Evaluated Genetic Algorithm
VR	válvula de retenção
VRP	válvula redutora de pressão

LISTA DE SÍMBOLOS

a	alternativa, elemento da matriz de incidência
\hat{A}	matriz de incidência de ordem $NT \times NN + NR$
A	vetor dos critérios de ordem M , sub-matriz de incidência de ordem $NT \times NN$
A^+	subconjunto de critérios dominantes
$A^=$	subconjunto de critérios indiferentes
A^-	subconjunto de critérios dominadas
A_r	sub-matriz de incidência de ordem $NT \times NR$
B	coeficiente da equação de curva característicada bomba
b	expoente do operador de mutação
\mathbf{b}	vetor auxiliar de ordem N
C	conjunto de mínimo corte, coeficiente de perda de Hazen-Williams
\mathbf{C}	matriz diagonal de ordem NT
\mathbf{C}'	matriz diagonal de ordem NT
$C()$	custo total do sistema, métrica de desempenho C
CA	capacidade de atendimento
$CB()$	custo unitário do conjunto motor-bomba
\mathbf{C}_{dem}	matriz diagonal de ordem NN com os termos demanda dependente
CE	custo do kWh de energia
CM	confiabilidade mecânica
CM_{TOT}	probabilidade de todos os componentes da rede estarem funcionando
CH	confiabilidade hidráulica
c	constante de nó
CF	confiabilidade
CL	coeficiente de vazamento por unidade de comprimento
cp	coeficiente de penalidade
$CR()$	custo unitário do reservatório
$CT()$	custo de um trecho da rede
\mathbf{C}_{dem}	matriz diagonal de ordem NN com os termos de vazamento
D	fluxo externo
$D()$	índice de discordância
d	diâmetro da tubulação, distância entre duas soluções
\mathbf{d}	vetor de ordem NT com os diâmetros das tubulações da rede
da	distância de aglomeração

dh_i	diferença de alturas no balanço de energias no anel
E	vetor de ordem \bar{P} da população externa, matriz do erro resultante
ENV	efeito do envelhecimento
EXPA	expansibilidade
F	equação de balanço hidráulico no nó
f	função densidade de probabilidade de falha do componente, fator de atrito
fa	fator de atendimento do nó
f_t	fator de tempo
f_l	fator local
FO	função objetivo
g	aceleração da gravidade
$g()$	função de restrição de desigualdade
G_f	grafo de preferência forte
q_f	grafo de preferência fraca
h	carga hidráulica
h	vetor de ordem NN com as cargas hidráulicas
h_r	vetor de ordem NR com as cargas nos reservatórios
$h()$	função de restrição de igualdade
h_{bomba}	altura de bombeamento do conjunto motor-bomba
HR	a elevação do reservatório
h_{red}	carga hidráulica de serviço
h_{valv}	carga a montante da válvula
I	resiliência
I	indiferente
I	resilientropia
II	número de iterações iniciais
is	coeficiente de distribuição
K	coeficiente de perda por vazamento, número de funções de igualdade, quantidade de pontos da frente não dominada a se determinar, coeficiente de resistência da tubulação
K'	resistência total do trecho com válvula
$K()$	número de condicionamento da matriz
K^{valv}	resistência adicional imposta pela válvula ao sistema
k	número de trechos adjacentes ao nó
J	perda de carga, número de funções de desigualdade

J	matriz Jacobiana
<i>j</i>	perda de carga unitária
<i>L</i>	comprimento do trecho de tubulação
L	matriz genérica de ordem N
<i>l</i>	comprimento ocupado por um diâmetro no trecho, elemento da matriz L
<i>l_j'</i>	comprimento do nó de montante até a válvula
M	número de períodos, número de objetivos do problema
N	número de variáveis de decisão
<i>N()</i>	nós imediatamente a jusante de um nó
<i>n</i>	expoente da equação de demanda variável, número de rotações do conjunto motor-bomba
<i>n()</i>	número de trechos incidentes a um nó
NA	número de anéis ou malhas naturais da rede
NB	número de bombas do sistema
<i>nh</i>	número médio de horas de utilização anual
NI	número de iterações
NN	número de nós da rede
<i>ns</i>	número de problemas a ser otimizado
<i>nt_i</i>	número de diâmetros comerciais atribuídos a um trecho
<i>nz</i>	número de elementos não zero
NT	número de trechos da rede
<i>P</i>	pressão no nó <i>j</i> no período, conjunto de soluções, tamanho da população
P	preferível
P¹	matriz pré-condicionadora
<i>P'</i>	conjunto de soluções não-dominadas
\bar{P}	tamanho da população externa
<i>p</i>	probabilidade, limite de concordância, limite de indiferença
<i>pf</i>	probabilidade de um tubo estar quebrado
<i>POT_{int}</i>	potência hidráulica interna
<i>POT_{ext}</i>	potência hidráulica externa
<i>POT_{req}</i>	potência hidráulica requerida
<i>POT_{tot}</i>	potência hidráulica total
Pot	potência do conjunto motor-bomba
<i>q</i>	vazão na tubulação, limite de discordância, limite de preferência estrita
q	vetor de ordem NT com as vazões nas tubulações da rede

Q	demanda no nó, vazão proveniente de reservatório
\mathbf{Q}	vetor de ordem NN com as demandas nos nós da rede
Q	fracamente preferível
R^*	intervalo da escala do critério
r	função densidade de probabilidade do reparo, ranking, número randômico entre 0 e 1
$r()$	valor de credibilidade
Re	número de Reynolds
RM	risco mecânico
rs	risco
rp	probabilidade do reparo do componente ser efetuado antes do tempo
S	<i>entropia</i> , métrica de desempenho S
\mathbf{S}	conjunto de trechos
$\mathbf{S}()$	força de uma solução
\check{S}	grau de hierarquia
$s()$	fator de divisão de nicho
SP	métrica espaçamento
sp	menor distância entre duas soluções
T	período total de tempo, caminho mínimo
\mathbf{T}	matriz de ordem $P \times P$ com a relação entre duas alternativas
t	comprimento do período de tempo, número de indivíduos no torneio, iteração
t'	tempo para reparo
t_{bomba}	tempo anual de bombeamento do conjunto motor-bomba
TL	tolerância
t_{max}	número máximo de iterações
$TMEF$	tempo médio entre falhas
TMF	tempo médio para falha
TMR	tempo médio de falha
W	soma dos pesos dos critérios
w	peso
V	hipervolume
v	limite de veto, volume delimitado pelos vértices
$v'()$	classificação regressiva da alternativa
$v''()$	classificação progressiva da alternativa
\bar{v}	classificação final da alternativa

Vaz	vazamento
Vol	volume
\mathbf{X}	vetor de variáveis
\mathbf{x}	vetor de ordem N com as variáveis de decisão
x	variável de decisão
X_f	região factível
Y	subconjunto do grafo de preferência forte
y	subconjunto do grafo de preferência fraca, vetor auxiliar de ordem N
Z	vetor de ordem M das funções objetivo
Z^*	vetor objetivo ideal
Z^{nad}	vetor objetivo nadir
Z	função objetivo
z	cota do terreno
α	taxa de amortização, coeficiente do operador de recombinação BLX- α , expoente da fórmula de perda de carga
χ	valor da função de aptidão
χ'	aptidão final
Λ	vetor de ordem P população geradora
δ_0	vetor de ordem P população gerada
ε	valor da restrição, rugosidade absoluta da parede interna do tubo
η	rendimento do conjunto motor-bomba
Γ	frente
γ	peso específico da água, coeficiente do método híbrido
$\Pi()$	função de preferência
$\pi()$	índice de preferência
μ	média
$\kappa()$	índice de concordância
ϕ_0	fluxo final para ordenação do PROMETHEE
ϕ^+_0	fluxo positivo para ordenação do PROMETHEE
ϕ^-_0	fluxo negativo para ordenação do PROMETHEE
φ	coeficiente de perdas por unidade de superfície do tubo
Ψ	vetor de ordem 2P de população
Ψ	custo anual amortizado da unidade linear do tubo com diâmetro d
ρ	massa específica da água

σ	desvio padrão
σ_{nicho}	raio do nicho
θ	expoente de vazamento
Ω^+	<i>soma dos pesos</i> do subconjunto de critérios dominantes
Ω^-	<i>soma dos pesos</i> do subconjunto de critérios indiferentes
Ω	<i>soma dos pesos</i> do subconjunto de critérios dominados
ω	peso do critério, velocidade relativa
τ	valor booleano tomado como sendo -1 ou 1
\emptyset	perfeito estado operacional
\wp	parâmetro da função entropia
\succ	domina
ζ	parâmetro do processo de destilação
\prec	é dominado
\sim	indiferente

Subescrito

c	<i>trecho de tubulação</i>
i	trecho de tubulação, nó, intervalo de tempo, caminho, limites de variáveis, função objetivo, alternativa
j	nó, trecho de tubulação, reservatório, função de desigualdade, alternativa
k	nó, reservatório, conjunto motor-bomba, função de igualdade, alternativa, critério, iteração
m	árvores
o	condição de demanda
tot	total
v	vértice

Sobescrito

Dem	atendito
k	função de desigualdade
L	limite inferior
min	mínimo
norm	normalizado
req	requerido
U	limite superior

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	iii
RESUMO	iv
ABSTRACT	v
LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE TABELAS	xi
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xvii
LISTA DE SÍMBOLOS	xix
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Análise de Sistemas de Distribuição de Águas	2
1.1.1 Dimensionamento do Sistema	3
1.1.2 Operação do Sistema	4
1.1.3 Calibração de Modelos	5
1.2 Dificuldades na Aplicação de Modelos de Otimização de Sistemas de Distribuição de Água	6
1.2.1 Inadequação dos Modelos	6
1.2.2 Dificuldade de Assimilação dos Modelos	7
1.3 Objetivos	7
2. DIMENSIONAMENTO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA	9
2.1 Otimização do Custo	11
2.1.1 Programação Não Linear Irrestrita	12
2.1.2 Métodos Empíricos	14
2.1.3 Programação Linear	14
2.1.4 Programação Não Linear com Restrições	18
2.1.5 Otimização Global	19
2.1.5.1 Métodos Bifurcação e Limite (Branch and Bound)	21
2.1.5.2 Algoritmos Evolucionários	22
2.1.5.3 Simulated Annealing	23
2.1.5.4 Outros Métodos de Otimização Global	23
2.1.6 Considerações Sobre os Métodos de Otimização do Custo	25
2.2 Otimização de Custo com Restrições de Confiabilidade	27
2.2.1 Conceitos Básicos de Confiabilidade	28
2.2.2 Confiabilidade em Redes de Distribuição de Água	29
2.2.2.1 Confiabilidade Mecânica (CM)	31
	xxv

2.2.2.2	Capacidade de Atendimento (CA)	32
2.2.3	Cálculo da Confiabilidade Hidráulica em Redes de Distribuição de Água	39
2.2.3.1	Modelos Analíticos	41
2.2.3.1.1	Método da Enumeração de Estados	41
2.2.3.1.2	Métodos de Simplificação da Rede	42
2.2.3.1.3	Métodos de Enumeração de Caminhos	43
2.2.3.2	Métodos de Simulação	46
2.2.3.2.1	Simulação Monte Carlo	48
2.2.3.2.2	Método do Corte Mínimo	49
2.2.3.3	Métodos Heurísticos	50
2.2.3.3.1	Entropia	51
2.2.3.3.2	Resiliência	55
2.2.4	Considerações Sobre os Métodos de Otimização do Custo com Restrições de Confiabilidade	57
2.3	Otimização Multiobjetivo	58
2.4	Perdas por Vazamento	60
2.4.1	Perdas Físicas	61
2.4.2	Perdas por Vazamentos nas Redes de Distribuição	62
2.4.3	Controle das Perdas por Vazamentos em Redes de Distribuição	63
2.4.4	Modelos de Vazamentos	64
2.4.5	Considerações sobre os Métodos de Otimização Multiobjetivo	67
3.	MÉTODOS MULTIOBJETIVOS	68
3.1	Introdução	68
3.2	Métodos de Geração de Frentes Não Dominadas	71
3.2.1	Definições	71
3.2.1.1	Problema da Otimização Multiobjetivo	71
3.2.1.2	Dominância	72
3.2.1.3	Vetor Objetivo Ideal	74
3.2.1.4	Vetor Objetivo Nadir	74
3.2.2	Métodos Clássicos	75
3.2.2.1	Método dos Pesos	76
3.2.2.2	Método das Restrições- ϵ	78
3.2.3	Métodos Multiobjetivos Baseados em Algoritmos Evolucionários (MOAE)	80

3.2.3.1	Princípios Básicos dos Algoritmos Genéticos	81
3.2.3.1.1	Representação das Soluções	82
3.2.3.1.2	Seleção	83
3.2.3.1.3	Aprimoramento das soluções	85
3.2.3.2	Metodologias Multiobjetivo Evolucionárias	85
3.2.3.2.1	(VEGA) - Vector Evaluated Genetic Algorithm	86
3.2.3.2.2	MOGA (Multiobjective Genetic Algorithm)	86
3.2.3.2.3	NSGA-II (Elitist Non-dominated Sorting Genetic Algorithm)	89
3.2.3.2.4	SPEA (Strength Pareto Evolutionary Algorithm)	93
3.3	Métodos Multiatributos	96
3.3.1	Métodos ELECTRE	98
3.3.1.1	Método ELECTRE III	98
3.3.2	Métodos PROMETHEE	102
4.	METODOLOGIA	105
4.1	Escolha dos Objetivos	106
4.2	Definição das Funções Objetivo	108
4.2.1	Custo	108
4.2.2	Confiabilidade	109
4.2.2.1	Capacidade de Atendimento	110
4.2.2.2	Entropia	111
4.2.2.3	Resiliência	112
4.2.2.4	Resilientropia	113
4.2.2.5	Expansibilidade e Efeitos do Envelhecimento	116
4.2.2.6	Cut-Set	116
4.2.3	Vazamentos	119
4.3	Geração de Alternativas	120
4.3.1	Operadores AGs	121
4.3.1.1	Operadores de Mutação	121
4.3.1.1.1	Operador de Mutação Randômico	121
4.3.1.1.2	Operador de Mutação Não Uniforme	122
4.3.1.2	Operadores de Recombinação	122
4.3.1.2.1	Operador de Recombinação Naive	122
4.3.1.2.2	Operador de Recombinação BLX- α	123
4.3.1.2.3	Operador de Recombinação Uniforme	124
4.3.2	Métricas de Desempenho	124

4.3.2.1	Métrica C	126
4.3.2.2	Métrica S	126
4.3.2.3	Espaçamento	127
4.4	Modelo de Análise Hidráulica	128
4.4.1	Equações Hidráulicas	128
4.4.1.1	Método Newton-Raphson (MNR)	130
4.4.1.2	Método da Teoria Linear (MTL)	131
4.4.1.3	Método Híbrido de Nielsen	131
4.4.1.4	Método do Gradiente	132
4.4.1.5	Vazamentos e Demanda Variável com a Pressão	133
4.4.1.6	Modificação dos Métodos de Resolução	134
4.4.2	Componentes Hidráulicos	135
4.4.2.1	Válvula de Retenção	135
4.4.2.2	Válvula de Redutora de Pressão	136
4.4.3	Resolução dos Sistemas de Equações	138
4.4.3.1	Reordenação	138
4.4.3.2	Método de Resolução dos Sistemas de Equações	138
4.4.3.2.1	Fatorização de Cholesky	139
4.4.3.2.2	Método do Gradiente Conjugado	140
4.4.3.2.3	Pré-Condicionamento	141
4.5	Seleção das Alternativas	144
4.6	Redes Empregadas no Estudo	146
4.6.1	Rede Teste I	146
4.6.2	Rede Dois Aneis (Two-Loop)	148
4.6.3	Rede do Bairro do Bessa (João Pessoa - PB)	150
4.6.4	Rede do Sistema RF1 (Campo Grande- MS)	155
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	162
5.1	Definição de Ferramentas e Parâmetros	162
5.1.1	Métodos de Resolução do Modelo Hidráulico	162
5.1.1.1	Método de Solução do Balanço Hidráulico	163
5.1.1.1.1	Análise dos Resultados	164
5.1.1.2	Método de Solução dos Sistemas de Equações Lineares	166
5.1.1.2.1	Sistemas com Malha Regular	168
5.1.1.2.2	Sistemas com Malha Irregular	170
5.1.1.2.3	Análise dos Resultados	173

5.1.2	Método de Geração de Soluções Não Dominadas e Seus Operadores	174
5.1.2.1 -	Análise dos Resultados	177
5.2	Rede Dois Anéis	179
5.2.1	Geração das alternativas	181
5.2.1.1	Geração de Alternativas para a Simulação 1	181
5.2.1.2	Geração de Alternativas para a Simulação 4	184
5.2.1.3	Cálculo das Funções Objetivo das Simulações 2 e 3	186
5.2.1.4	Cálculo das Funções Objetivo das Simulações 5 e 6	188
5.2.2	Ordenação das Alternativas	190
5.2.2.1	Ordenação das alternativas das Simulações 1, 2 e 3	192
5.2.2.2	Ordenação das alternativas das Simulações 4, 5 e 6	195
5.3	Rede do Bessa	197
5.3.1	Geração de Alternativas	197
5.3.1.1	Simulações 1, 2 e 3	197
5.3.1.2	Simulações 4, 5 e 6	200
5.3.2	Ordenação das Alternativas	202
5.3.2.1	Simulações 1, 2 e 3	202
5.3.2.2	Simulações 4, 5 e 6	203
5.4	Rede RF1	208
5.4.1	Geração de Alternativas	208
5.4.1.1	Simulações 1, 2 e 3	209
5.4.1.2	Simulações 4, 5 e 6	211
5.4.2	Ordenação das Alternativas	213
5.4.2.1	Simulações 1, 2 e 3	213
5.4.2.2	Simulações 4, 5 e 6	214
5.5	Rede RF1 - com Locação de Válvulas Redutoras de Pressão	214
5.5.1	Geração de Alternativas	215
5.5.1.1	Ordenação das Alternativas	218
6 CONCLUSÕES		220
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		225
ANEXO A - RESULTADOS DAS METODOLOGIAS EMPREGADAS		239

1. INTRODUÇÃO

Durante a maior parte da sua história o homem viveu da caça, pesca e coleta de frutos, motivo pelo qual se manteve na condição de nômade por todo esse período. Somente há cerca de 10.000 anos, o ser humano começou a habitar em locais fixos, desenvolvendo técnicas como agricultura e criação de animais, que se tornaram a base de sua alimentação desde então (MAYS, 2002).

Os locais escolhidos para a moradia definitiva eram, em sua maioria, construídos às margens de rios ou grandes lagos, que por sua vez tornaram-se a fonte primária de água para as primeiras comunidades. À medida que os aglomerados de pessoas aumentaram, foram se formando as primeiras vilas, ou aldeias. Por volta do ano 6.000 a.C., as primeiras cidades começaram a surgir na Mesopotâmia e na Síria, o que levou à necessidade de se levar água a locais cada vez mais distantes das margens dos mananciais (MAYS, 2002)

A obrigação de se transportar água a locais cada vez mais distantes produziu a priorização do desenvolvimento de técnicas específicas para esse fim. O apogeu dessas técnicas na antiguidade ocorreu durante a época do Império Romano, que foi responsável pela construção de sistemas de distribuição de água em cidades com mais de 200.000 habitantes, que é um feito memorável até para os dias atuais.

Um dos aspectos interessantes a respeito dos sistemas de distribuição da antiguidade é que eles foram projetados baseados em conceitos completamente empíricos o que continuou sendo feito até meados do Século XIX, quando se começou estudar com mais profundidade o comportamento do transporte hidráulico, principalmente relacionado às perdas de carga ao longo de condutos, canais e demais dispositivos empregados em sistemas de distribuição de águas. Estudos como os de Bernoulli, Poiseuille, Darcy, Manning e muitos outros, foram fundamentais para a melhor compreensão dos fenômenos envolvidos na dissipação de energia hidráulica.

No início do século, a resolução de problemas para sistemas simples de distribuição de água estava praticamente resolvido, através, por exemplo, da utilização de uma formulação como a de Bresse. Porém, o mesmo não acontecia com as redes de abastecimento de água, em geral malhadas. A avaliação dessas redes era efetuada transformando-se a rede original numa rede ramificada virtual, através de um seccionamento fictício da mesma, sendo que a escolha dos pontos de seccionamento decorria da experiência do projetista.

Em 1936, Cross propôs um método de aproximações sucessivas que acabou sendo considerado o primeiro modelo científico utilizado na análise de redes (LANSEY E MAYS, 2000). Esse método, desenvolvido para ser implementado manualmente, através de planilhas de cálculo, acabou se tornando a ferramenta responsável pelo dimensionamento da maioria dos sistemas que estão em funcionamento no mundo.

Com o surgimento dos computadores nos anos 50, métodos mais elaborados começaram a ser desenvolvidos. A tecnologia digital também possibilitou uma redução drástica no tempo de cálculo necessário, o que por sua vez, possibilitou analisar um número maior de alternativas de modo que se pudesse encontrar qual seria a melhor para determinado aspecto. Esse procedimento é chamado de “*Análise de Sistemas de Distribuição de Águas*” (WALSKI, 1984).

1.1 *Análise de Sistemas de Distribuição de Águas*

Segundo a U.S. Office of Technology Assessment (OTA), a análise de sistemas é definida como sendo uma rotina, ou algoritmo, de busca empregada de modo a se escolher uma alternativa com base em princípios pré-estabelecidos (FRIEDMAN et al. 1984). Assim, a utilização de um modelo computacional não pode ser considerada como análise de sistema, a não ser que a alternativa seja escolhida com base em um algoritmo de busca, ou seja, que haja uma otimização no processo (ROGERS E FIERING, 1986).

O desenvolvimento dos computadores e principalmente das técnicas de análise baseada nos mesmos, implicou numa profunda mudança na forma de se elaborar projetos na Engenharia de um modo geral. Para se utilizar toda a capacidade de processamento disponível tornou-se necessário repensar a maneira como são feitos os projetos. Está nessa reformulação, e não na criação de rotinas automatizadas, o principal entrave na utilização da análise de sistemas aplicada aos sistemas de distribuição de água, uma vez que os engenheiros atuais, ainda, têm a tendência de formular as etapas do projeto como se este fosse feito ainda manualmente (NEUFVILLE, SCHAAKE E STAFFORD, 1971).

Ao longo das três últimas décadas, centenas de trabalhos foram desenvolvidos em todo o mundo com o objetivo de definir metodologias que pudessem ser utilizadas de forma eficaz na análise de sistemas de distribuição de água. Essas pesquisas procuravam resolver, através de técnicas de otimização, os diversos problemas inerentes ao *dimensionamento*, *operação*, e *calibração* dos sistemas de abastecimento de água existentes.

1.1.1 Dimensionamento do Sistema

O propósito dos sistemas de distribuição de água é fornecer água em quantidade e qualidade com um determinado nível de pressão aos consumidores finais. Uma vez que o número de alternativas possíveis, que atendem a esse princípio, é muito grande, o problema torna-se indeterminado. A forma clássica de se solucionar esse problema é o método de tentativa e erro, em que o projetista simula algumas alternativas, utilizando um modelo hidráulico do sistema estudado, modificando as variáveis, no caso os diâmetros da rede, de modo que, se obtenha ao final um “desenho” que satisfaça às condições prepostas. No entanto, devido à complexa interação entre os diversos dispositivos que compõe os sistemas de distribuição de água, a escolha correta dos vários componentes pode ser difícil de se fazer, mesmo para sistemas considerados de médio porte.

Com o objetivo de melhorar o processo de definição dos componentes das redes de distribuição de água, foram desenvolvidos métodos, baseados em técnicas de otimização, que procuram definir a melhor configuração da rede utilizando ferramentas de otimização como Programação Linear (ALPEROVITZ e SHAMIR, 1979; BHAVE, 1979; FUJIWARA ET AL. 1987), Programação Não Linear (VARMA, NARASIMHAN E BHALLAMUDI, 1997; FORMIGA, 1999), Programação Dinâmica (LEAL, 1995), Algoritmos Genéticos (SIMPSON, DANDY e MURPHY, 1994; SAVIC e WALTERS, 1997), entre outras.

O princípio básico dos modelos de otimização utilizados até hoje é a minimização dos custos, tendo como restrições básicas o atendimento das demandas com um nível mínimo de pressões nos nós da rede. Porém, verificou-se em estudos práticos que as restrições não deviam ser limitadas apenas ao atendimento das pressões na rede. Aspectos como os níveis de confiabilidade e redundância do sistema (ROWELL e BARNES, 1982), bem como o comportamento do mesmo quando submetido a diferentes demandas (ALPEROVITZ e SHAMIR, 1979; REIS, PORTO E CHAUDHRY, 1997), passaram a figurar como critérios de otimização de redes de distribuição de água.

Durante a última década, a conservação da água passou a comandar as políticas de saneamento no mundo, e em especial nos países em desenvolvimento que é a conservação da água. Uma das medidas empregadas por parte das companhias de abastecimento de água é a redução de vazamentos, ou perdas físicas da rede. Sendo a disposição de válvulas redutoras de pressão dentro da rede uma das ações que mais

têm sido empregadas para esse fim (JOWITT e XU, 1990; REIS, PORTO e CHAUDHRY, 1997).

1.1.2 Operação do Sistema

Os sistemas de distribuição de água são estruturas complexas que carecem de ser bem operados para funcionar adequadamente. O objetivo primário de se operar esses sistemas é manter os níveis de pressão hidráulica na rede dentro de faixas operacionais com o menor custo possível, mesmo quando ocorrem emergências como: quebra de tubulações, contaminação de fontes, falta de energia, incêndios, etc.

A operação de SDAs consiste basicamente em ligar e desligar bombas e/ou abrir e fechar válvulas de modo a atender as demandas com um nível de pressão adequado. A principal variável da operação desses sistemas são os níveis de água nos reservatórios do sistema ao longo do dia.

O problema da operação também é indeterminado, uma vez que os objetivos desejados podem ser atingidos agindo-se de várias formas diferentes. Tradicionalmente, como meio de se aumentar a confiabilidade do sistema, costuma-se operá-lo tentando manter os níveis de água nos reservatórios na cota máxima. Essa prática tornou-se menos aceita em virtude do aumento das exigências referentes à qualidade da água nas redes e dos elevados custos com energia elétrica necessários para isso. Essa regra operacional também aumenta as pressões nas rede, implicando no aumento das perdas por vazamento no sistema.

Ao se armazenar água por muito tempo nos reservatórios, ocorre a diminuição na concentração de cloro dissolvido, que é um indicativo importante do nível de pureza da água.

A energia elétrica é a responsável pelos maiores gastos nos sistemas de distribuição de água. Uma diminuição no consumo de energia, por menor que seja, pode representar uma economia muito grande para a companhia de abastecimento e conseqüentemente para os consumidores. Com o objetivo de se melhorar a eficiência econômica dos sistemas, passou-se a empregar a Análise de Sistemas no problema de operação das redes de distribuição de água.

Nos problemas de otimização propostos, procura-se, na maioria dos casos, minimizar os custos devido ao bombeamento. As restrições do problema podem ser de limites físicos (volume e níveis dos reservatórios), leis de funcionamento (conservação da energia e conservação de massa) de operação (pressão nos nós). A incorporação

das restrições à qualidade da água no sistema pode ser feita diretamente na função objetivo, através da minimização dos desvios da concentração ou por meio de restrições quanto à concentração de cloro nos nós (GOLDMAN ET AL. 2001).

Outra área de pesquisa é a previsão do comportamento dos sistemas quando da ocorrência de emergências no sistema e a maneira de se minimizar os seus efeitos para os consumidores através da operação adequada de válvulas e bombas (FUJIWARA E LI, 1998).

1.1.3 Calibração de Modelos

Para se realizar uma operação eficiente do sistema, é fundamental conhecê-lo e compreendê-lo, sendo a modelagem uma das formas de se prever a resposta de um sistema, quando submetido a condições ainda não observadas. A forma mais comum de se modelar uma rede é feita através do emprego de modelos de análise hidráulica que procuram, por meio de sistema de equações, determinar as vazões nos trechos, e as cargas hidráulicas na rede, a partir de dados de demandas, diâmetros dos tubos, rugosidades, carga hidráulica de cabeceira, dados do conjunto motor-bomba, etc.

Após a instalação da rede o principal parâmetro que determina a perda de carga no tubo, que é a sua rugosidade, começa a sofrer alterações devido à corrosão do material, alterando assim o comportamento inicial da rede, feito quando da época de projeto e início de funcionamento. Dessa forma, o modelo hidráulico utilizado para o dimensionamento da mesma, precisa ser atualizado, do modo que possa também ser empregado para a operação do sistema.

A determinação dos parâmetros do modelo hidráulico da rede diretamente é cara e ineficiente, assim, procura-se determinar os coeficientes de perda de carga por meio de medidas indiretas como carga hidráulica nos nós e vazões nos trechos. Tal procedimento é chamado de calibração do modelo da rede. Ao longo das últimas décadas foram criadas muitas metodologias para este fim que podem ser classificadas em: métodos diretos (WALSKI, 1983a; ORMSBEE E WOOD, 1986; BOULOS E WOOD, 1990) e métodos indiretos (ORMSBEE, 1989; LANSEY E BASNET, 1991).

Nos métodos diretos, o cálculo dos parâmetros da rede é feito de forma analítica, sendo necessário para a obtenção dos resultados a mesma quantidade de variáveis e informações (CHEUNG, 2001).

Os métodos indiretos, ou implícitos, procuram determinar os parâmetros a partir de um procedimento iterativo, em que um método de otimização é aplicado na

minimização de uma função objetivo. A função empregada, que geralmente é a do quadrado dos erros, é composta por duas partes uma se refere aos erros observados nas medições de pressão, enquanto que a outra afere as diferenças nas vazões observadas e calculadas. Determinar os pesos de cada uma dessas partes têm sido motivo de diversos trabalhos (DATTA E SRIDHARAN, 1994, REDDY, SRIDHARAN E RAO, 1996; RIGHETTO, 2001; SOARES, 2003; SILVA, 2003). Diversas técnicas de otimização têm sido empregadas na calibração de redes pelo método indireto, dentre elas se destacam:

1.2 Dificuldades na Aplicação de Modelos de Otimização de Sistemas de Distribuição de Água

Embora faça mais de 30 anos que a Análise de Sistema passou a ser utilizada nas pesquisas de sistemas de distribuição de água, são raros os casos em que métodos de otimização são aplicados em situações práticas, principalmente quando se trata do dimensionamento do sistema.

Na última década, no entanto, esse vazio de aplicação começou a preocupar os principais pesquisadores da área, uma vez que o estado da arte dos modelos desenvolvidos até então era considerado suficiente para resolver o problema proposto. Verificou-se após uma análise mais crítica alguns motivos para o não emprego, até o momento, da Análise de Sistemas ao dimensionamento de sistemas de distribuição de água (GOULTER 1992, LAURIA 1993, WALSKI 2001), a saber:

- inadequação dos modelos
- dificuldade de assimilação dos modelos

1.2.1 Inadequação dos Modelos

Os modelos desenvolvidos até o momento apresentam algumas falhas que podem inviabilizar o seu uso no processo de dimensionamento dos SDA's. Dentre as inadequações encontradas pode-se citar:

- *Resultados não reais* - diâmetros contínuos, especificações não comerciais (MAYS, 1989).
- *Resultados incoerentes* - quando se otimiza apenas o custo as redes resultantes tendem a ser ramificadas. (ALPEROVITZ E SHAMIR, 1979)
- *Funções objetivo pouco representativas* - a utilização do custo como forma de se chegar a rede ideal não reflete a realidade, uma vez que, ao se

reduzir o custo, está-se desconsiderando outros aspectos relevantes como a capacidade de atendimento.

- *Dificuldade de se estabelecer restrições* - para contornar o problema da função objetivo, tentou-se desenvolver algumas funções de restrições baseadas na confiabilidade, só que essas funções ou são difíceis de se calcular, o que torna o seu emprego em problemas de otimização impraticável (FUJIWARA E TUNG, 1993) ou tem um significado muito abstrato, o que torna a definição de um valor que sirva como restrição difícil (GOULTER 1992, TANNIMBOH E TEMPLEMAN, 2002).
- *Resultados restritivos* - a maioria dos métodos de otimização apresentam apenas um resultado que deve ser então acatado ou rejeitado pelo projetista, este é um fator importante para a não utilização dos mesmos.

1.2.2 Dificuldade de Assimilação dos Modelos

Se por um lado os modelos ainda não estão totalmente desenvolvidos, por outro os futuros usuários ainda não estão suficientemente familiarizados com as ferramentas utilizadas. Goulter (1992) constatou que a maioria dos projetistas dos Estados Unidos pouco conhecia a respeito das ferramentas de Análise de Sistemas, e pareciam estar pouco confortáveis em utilizar os métodos desenvolvidos.

Uma das prerrogativas necessárias à utilização de uma ferramenta, principalmente quando está se lidando com obras que podem funcionar por mais de 50 anos, é a confiança no método que está sendo empregado. Caso a ferramenta seja uma "caixa preta" para o usuário, muito provavelmente este irá preferir utilizar um método menos eficiente, mas que lhe seja de amplo conhecimento.

1.3 Objetivos

Uma solução apontada para esse problema é a utilização de métodos multiobjetivos (WALSKY, 2001). Não obstante o primeiro trabalho a sugerir a abordagem multiobjetivo na análise de SDA's ter sido escrito há mais de três décadas (NEUFVILLE, SCHAAKE E STAFFORD, 1971), o emprego explícito de métodos multicriteriais para esse propósito só ocorreu no final da década de 1990. Tal fato se deve, em parte, a significativa capacidade computacional exigida pelos métodos multiobjetivos e, principalmente, pela evolução de algumas técnicas de otimização, que só pode ser superada com os computadores mais modernos.

O objetivo geral desse trabalho é desenvolver uma metodologia de dimensionamento de redes de distribuição de água considerando um enfoque multiobjetivo. O método desenvolvido levará em conta três aspectos referentes ao projeto desses sistemas: custo; confiabilidade e perdas por vazamentos. Para tanto, será empregado um método de otimização multiobjetivo baseado em algoritmos genéticos para a geração do conjunto de soluções não-dominadas e um método multicriterial para escolha da alternativa final.

São objetivos específicos desse trabalho:

1. visitar a bibliografia referente ao dimensionamento de redes, identificando os principais questionamentos a respeito do problema;
2. desenvolver e implementar um modelo de análise hidráulica que leve em consideração as perdas por vazamentos e a demanda dirigida pela pressão;
3. propor uma forma de quantificação da confiabilidade que expresse o efeito da mesma sem a necessidade de se processar um grande número de cálculos adicionais.

2. DIMENSIONAMENTO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

O dimensionamento, ou projeto, de sistemas de distribuição pertence ao contexto geral da análise sistemas de redes de abastecimento de água. No entanto, esse dimensionamento não é um problema único que pode ser, todo ele, resolvido por meio de um modelo geral apenas. Ao contrário, é um problema abrangente que envolve diferentes tipos de escolha. Assim, em função das respostas requeridas pelo modelo, diferentes considerações e simplificações são adotadas de modo a se ter um problema passível de solução.

Walski (1995) classifica o problema do dimensionamento de sistemas de distribuição de água em quatro diferentes tipos: planejamento; projeto preliminar de sistemas de distribuição; dimensionamento de redes locais e reabilitação. Uma visão geral de cada um desses problemas é apresentada a seguir.

As ações de planejamento em sistemas de distribuições de água visam tomar decisões, que terão repercussão de longo prazo, cobrindo mais de 20 anos, baseando-se nas estipulações dos planos diretores municipais, ou planos de ocupação e uso do solo. De maneira geral, o planejamento de sistemas abastecimento indica as diretrizes a serem seguidas quando da implantação de um sistema composto das redes, reservatórios, estações de bombeamento, etc. Outro ponto importante do planejamento é a indicação de um plano de implementação de cada etapa do sistema ao longo do tempo. Por lidar com grandes quantidades de informações e variáveis, o campo de atuação do planejamento está restrito às grandes tubulações, maiores que 400 mm. Além do mais, a precisão dos resultados, com relação ao aspecto das dimensões dos componentes, não é tão importante quanto nas outras etapas (WALSKY, 1995).

O dimensionamento das linhas de transmissão é um caso a parte na análise de sistemas de distribuição de água. Esses sistemas se caracterizam por não apresentarem distribuição em marcha, sendo responsáveis pela interligação direta entre as diversas fontes que atenderão o sistema, e as redes de distribuição de água (RDAs). Na maioria dos casos os sistemas de distribuição são compostos por adutoras, e/ou redes ramificadas. Assim, embora sejam responsáveis pelo transporte de grandes quantidades de água, do ponto de vista da pesquisa operacional, o dimensionamento

dessas linhas é relativamente simples (WALSKI, 1995). Outro aspecto, além da definição das dimensões dos tubos, é a determinação do traçado das linhas. Se a tubulação irá passar através de uma região já urbanizada, com ruas asfaltadas e de tráfego intenso, ou contornar esse local, é uma decisão que envolve vários aspectos econômicos, políticos, ambientais, de difícil quantificação. Outro ponto que pode ser explorado no dimensionamento de linhas é uma análise dos transientes hidráulicos na tubulação, em que a escolha do local de instalação e o dimensionamento das estruturas anti-golpe a serem empregadas são questões relevantes nesta etapa do projeto.

O dimensionamento de RDAs propriamente dito, que é o foco deste trabalho, diz respeito à definição dos diâmetros e do material das tubulações a serem utilizados na rede. O princípio básico que rege essa etapa é atender uma determinada demanda em um local da rede dentro de uma faixa de pressões, da maneira eficiente e segura. Além dos diâmetros das tubulações, o dimensionamento e localização de componentes dentro das redes, como bombas do tipo Booster e válvulas de controle, deverão ser feitos nesta etapa. Aspectos mais detalhados do dimensionamento de redes serão abordados nos itens posteriores deste capítulo. Embora seja o tema mais estudado dentro da otimização de sistemas de distribuição de água, o dimensionamento de redes ainda não está totalmente resolvido. Em face disso, esta tese procura dar uma contribuição para o aprimoramento das técnicas de projeto desta parte do sistema.

Outro problema que pode ser classificado como dimensionamento de RDAs é a reabilitação do sistema. A reabilitação de RDAs vem se tornando um dos problemas de dimensionamento mais comuns na atualidade. Dado que a maioria das cidades já dispõe de sistemas de distribuição de água em funcionamento, o ritmo de implantação de redes de abastecimento de água no Brasil diminuiu consideravelmente na última década, sendo que atualmente, tem-se investido mais nas fases de expansão e/ou aumento da capacidade de abastecimento das redes existentes. Conceitualmente, a reabilitação de uma rede de abastecimento se dá quando a mesma não é capaz de suprir as demandas com uma pressão mínima requerida. Essa perda de capacidade de atendimento é decorrente, principalmente, da deterioração da tubulação e do aumento do consumo para valores além daqueles projetados.

Diferentemente dos outros métodos classificados como dimensionamento, a reabilitação não se restringe apenas à escolha dos diâmetros das tubulações. Outras medidas como: limpeza dos tubos, troca dos revestimentos de vários tipos, colocação de tubulação em paralelo, dentre outras, podem ser adotadas, e devem ser computadas no processo de otimização, considerando os seus custos e as melhorias acrescentadas à rede (CHEUNG, 2004).

A Análise de Sistemas aplicada ao dimensionamento de redes de distribuição de água (RDAs) data do final da década de 1960. Desde então, houve uma contínua evolução dos métodos acompanhada por um aumento de complexidade dos problemas analisados. Devido à grande quantidade de trabalhos publicados, empregando diferentes abordagens para resolver esse problema, torna-se conveniente estabelecer uma classificação para se efetuar uma análise das metodologias desenvolvidas. Existem várias formas de se classificar os métodos de otimização de redes de abastecimento. Neste trabalho, tais métodos foram delineados conforme o tipo de finalidade de otimização desejada. Considerando isso esses podem ser divididos em:

- *Otimização do Custo*: neste tipo de otimização apenas o custo é considerado como fator determinante no dimensionamento.
- *Otimização do Custo com Restrições de Confiabilidade*: em que se otimiza explicitamente o custo, sendo que a confiabilidade é um fator limitante.
- *Otimização Multiobjetivo*: em que diversos objetivos são otimizados simultaneamente.

A seguir será feita uma análise da evolução dos métodos de otimização aplicados ao dimensionamento de sistemas de distribuição de água.

2.1 Otimização do Custo

O problema da otimização do custo de uma rede pode ser enunciado da seguinte forma (EUSUFF e LANSEY, 2003):

Encontrar uma combinação de tubos da rede correspondente ao mínimo custo em que são *conhecidos*:

- a topologia da rede e conectividade dos nós;
- as demandas nos nós;
- a pressão mínima requerida;

sujeito às seguintes *restrições*:

- *conservação de massa nos nós* - a quantidade de água que aflui a um nó deve ser igual à que deflui;
- *função de perda de carga nos trechos das tubulações* - que depende das características do tubo como: diâmetro, comprimento e rugosidade;
- *conservação de energia na rede* - a perda de carga entre dois pontos quaisquer da rede deve ser igual, independente do caminho percorrido pela água;
- atendimento à pressão mínima nos nós;
- atendimento às demandas nos nós;
- utilização de diâmetros comercialmente disponíveis, ou previamente definidos;

Ao longo das últimas décadas, uma grande quantidade de metodologias tem sido empregada para resolver o problema acima proposto. A seguir, é feita uma revisão das principais metodologias aplicadas ao problema de minimização dos custos das redes.

2.1.1 Programação Não Linear Irrestrita

Embora seja difícil datar qual foi o primeiro método de otimização utilizado para o dimensionamento de RDAs, pode-se afirmar que os mais difundidos inicialmente, e que serviram de base para os métodos posteriores foram os propostos por Jacoby (1968) e Karmelli, Gadish e Meyers (1968).

O método de otimização sugerido por Jacoby (1968) consiste na minimização da soma dos custos de investimento anual amortizado e dos gastos com a operação. A técnica de otimização empregada foi uma forma numérica do método do gradiente de Programação Não Linear (PNL), em que a direção de “descida” (*steepest descent*) era determinada a partir de pequenos movimentos em torno de um ponto. As variáveis de decisão do problema eram os diâmetros dos trechos, que foram considerados contínuos, e as respectivas vazões. Sendo o método de otimização empregado uma técnica irrestrita, e o problema do dimensionamento considerado como restrito apesar de existirem limitações físicas e de projeto, a forma de se adicionar essas condições foi através de penalidades. Assim a formulação proposta por Jacoby (1968) pode ser escrita da seguinte forma:

$$\begin{aligned}
\text{Min } C(\mathbf{d}, \mathbf{q}) = & \sum_{i=1}^{NT} \Psi(d_i) L_i + \sum_{k=1}^{NB} \frac{\rho g q_k h_{k \text{ bomba}} t_{k \text{ bomba}}}{\eta_k} + \\
& \sum_{j=1}^{NN} cp \left[\left(\sum_{i=1}^{k_j} q_i \right) - Q_j \right] + \sum_{a=1}^{NA} cp_a dh_a
\end{aligned} \tag{2.1}$$

em que: $C(\mathbf{d}, \mathbf{q})$ é o custo total do sistema, ou seja a soma dos custos de implantação e operação; d_i é o diâmetro da tubulação no trecho i ; q_i é a vazão do trecho i ; NT é o número de trechos da rede; $\Psi(d_i)$ é o custo anual amortizado da unidade linear do tubo com diâmetro d_i no trecho i (neste problema, como os diâmetros são contínuos, $\Psi(d_i)$ é dado por uma função polinomial que relaciona o custo da tubulação ao respectivo diâmetro); NB é o número de bombas do sistema; L_i é o comprimento do trecho i ; ρ é a massa específica da água; g é a aceleração da gravidade; h_{bomba} é a altura de bombeamento do conjunto motor-bomba k ; t_{bomba} é o tempo anual de bombeamento do conjunto motor-bomba k ; η_k é o rendimento do conjunto motor-bomba k ; NN é o número de nós da rede; cp é o coeficiente de penalidade; k_j é o número de trechos adjacentes ao nó j ; Q_j é a vazão demandada no nó j ; NA é o número de anéis ou malhas naturais da rede; dh_i é a diferença de alturas no balanço de energias no anel i .

Embora tenha sido um primeiro esboço de grande parte dos métodos de otimização que viriam a ser desenvolvidos, a formulação proposta por Jacoby (1968) apresenta duas falhas quanto à definição da função objetivo, uma vez que, nas penalidades, só foram incorporadas restrições físicas, equações da conservação de massa e conservação de energia, não havendo restrições a especificações de projeto como diâmetros máximos e mínimos, nem a pressão mínima a ser atendida. Outro problema do método de Jacoby, que será refletido em qualquer técnica de otimização irrestrita, é a definição dos coeficientes de penalidades (cp) uma vez que a escolha dos mesmos interfere diretamente nos resultados obtidos e na convergência do método.

Uma modificação do método proposto por Jacoby (1968), baseada no método das penalidades, foi formulada por Shamir (1974).

Shamir (1974) propôs um método original para época em que se fazia ao mesmo tempo a minimização dos custos e a definição de regras primárias de operação do sistema levando em conta mais de uma condição de carga do sistema. Isso só foi possível devido à retirada da análise hidráulica do sistema de dentro do algoritmo de otimização. Para tanto, ele utilizou o método Newton-Raphson (SHAMIR e HOWARD, 1968) para efetuar o balanço hidráulico da rede. O método de otimização empregado foi o dos Gradientes Reduzidos Generalizados (GRG), com uma função de penalidade.

A grande vantagem desse tipo de formulação é diminuir em mais de 50% a quantidade de variáveis de decisão, bem como o número de restrições do problema, quando comparado com a forma proposta anteriormente por Jacoby (1968). A desvantagem é que a separação da análise hidráulica do processo de otimização em si, pode aumentar consideravelmente o tempo de processamento, principalmente se o método utilizado para se efetuar a análise hidráulica não for eficiente o que pode inviabilizar a aplicação do método (FORMIGA ET AL 2003a).

2.1.2 Métodos Empíricos

Devido ao pouco desenvolvimento de métodos formais de otimização para aplicação direta em problemas de dimensionamento de redes de abastecimento, foram propostos ao longo da década de 1960 e 1970 alguns trabalhos baseados em métodos empíricos de dimensionamento. Pode-se citar como exemplo os trabalhos de Deb e Sarkar (1971) e Deb (1976) que empregou uma formulação alternativa, chamada de método dos *diâmetros equivalentes*, desenvolvido por Tong et al. (1961), na qual a inclinação da *superfície de pressão* da rede é um dado conhecido do problema. A função objetivo seria, então, a minimização do custo tendo como variável de decisão o perfil da superfície da rede.

A pesquisa com métodos empíricos para a análise hidráulica e/ou dimensionamento de redes malhadas de distribuição de água perdeu força à medida que os métodos de otimização clássicos se tornaram mais eficientes, tendo praticamente desaparecido nos anos 1980.

2.1.3 Programação Linear

As técnicas de otimização baseadas em PNL ainda estavam em processo de desenvolvimento na década de 1970 e os métodos mais empregados consistiam na resolução de problemas de otimização irrestrita, apresentando deficiências como a dificuldade na definição dos coeficientes de penalidades, além de encontrar como se como resultados apenas diâmetros contínuos que na maioria dos casos não eram disponíveis para venda. Nesse período, as técnicas de otimização mais robustas empregadas na análise de sistemas e que apresentavam melhores resultados eram baseados na técnica de Programação Linear (PL). Assim, grande parte das aplicações na Engenharia da época procurava linearizar os problemas de modo a poder utilizar essa ferramenta.

O outro trabalho pioneiro no dimensionamento das redes foi proposto por Karmelli, Gadish e Meyers (1968). Embora as redes ramificadas fossem o foco dessa metodologia, ela foi base de dezenas de trabalhos posteriores que a adaptaram para otimizar redes malhadas. O método de Karmelli, Gadish e Meyers (1968) parte do princípio de que as vazões nos trechos da rede são previamente conhecidas. Com isso, é possível formular o problema de forma que as equações tratadas sejam todas lineares, podendo-se assim utilizar uma ferramenta da Programação Linear (PL), como o método Simplex, em que o resultado obtido é um mínimo global, e as restrições físicas e de projeto podem ser expressas explicitamente.

O método proposto por Karmelli, Gadish e Meyers (1968) é baseado em uma seleção especial das variáveis de decisão, em que é utilizado o artifício de admitir uma série de diâmetros candidatos, dentre os comercialmente disponíveis para cada trecho (Figura 2.1), sendo as variáveis de decisão os comprimentos dos segmentos dos trechos com diâmetros constantes. Desse modo o custo de um determinado trecho i é fornecido por:

$$C(\mathbf{d})_i = \sum_{j=1}^{nt_i} l_{ij} \Psi(d_j)_i \quad (2.2)$$

onde $C(\mathbf{d})_i$ é o custo do trecho i da rede de distribuição; l_{ij} é o comprimento ocupado pelo diâmetro d_j no trecho i considerado; $\Psi(d_j)_i$ é o preço unitário do tubo de diâmetro d_j e nt_i é o número de diâmetros comerciais atribuídos ao trecho i em questão.

A função objetivo a ser minimizada via PL, cobrindo todos os trechos da rede, será expressa por:

$$C(\mathbf{d}, \mathbf{q}) = \sum_{i=1}^{NT} \sum_{j=1}^{nt_i} l_{ij} \Psi(d_j)_i \quad (2.3)$$

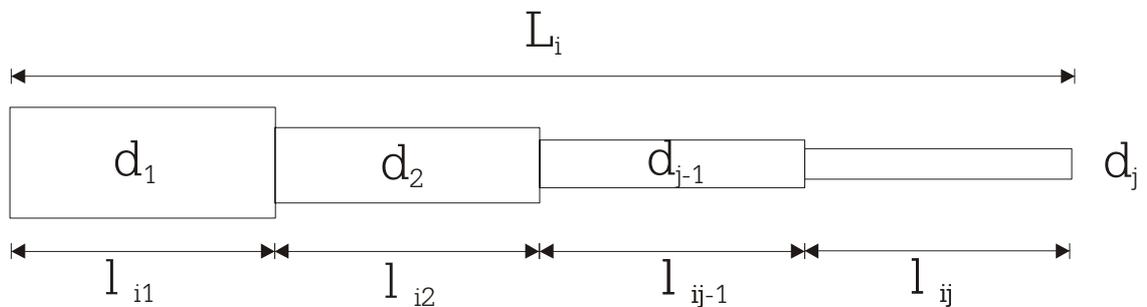


Figura 2.1 - Esquema da distribuição dos segmentos de trechos do método de Jacoby

A solução obtida deve estar sujeita às seguintes restrições físicas e de projeto:

1. Carga hidráulica nos nós deve ser maior que a mínima requerida:

$$Z - \sum_{c=1}^k J_c \geq Z_k \quad (2.4)$$

onde Z é a cota piezométrica de cabeceira na rede; Z_k é a cota piezométrica requerida no nó k e; $\sum J_c$ é a soma das perdas de carga nos trechos pertencentes ao percurso compreendido entre a cabeceira e o nó k .

2. A soma dos comprimentos l_{ij} , correspondentes aos distintos diâmetros d_j , atribuídos a cada trecho i , deve ser igual ao comprimento do trecho

$$\sum_{j=1}^{m_i} l_{ij} = L_i \quad (2.5)$$

3. Não negatividade dos comprimentos l_{ij}

$$l_{ij} \geq 0 \quad (2.6)$$

Um dos trabalhos mais importantes para o desenvolvimento de modelos de otimização empregados no dimensionamento de redes de abastecimento de água foi o proposto por Alperovitz e Shamir (1977) que empregava como ferramenta de otimização um método de PL modificado denominado de Gradiente de Programação Linear (GPL). Neste método as vazões nos trechos são inicialmente especificadas e o problema é resolvido através da PL considerando uma formulação semelhante à de Karmelli, Gadish e Meyers (1968), em que se pode trabalhar com diâmetros disponíveis comercialmente. Posteriormente, as vazões são modificadas de acordo com o Gradiente da Função Objetivo (GFO), sendo que Alperovitz e Shamir (1977) empregaram as variáveis duais obtidas a partir da resolução do problema de PL para este fim. Um novo problema, introduzindo as vazões modificadas, é formulado e resolvido através da PL, sendo o processo repetido até que a solução ótima seja encontrada.

Embora apresentassem pequenos erros na diferenciação do método de modificação dos diâmetros, que foram corrigidos posteriormente por Quidry et al. (1979), a formulação proposta por Alperovitz e Shamir (1977) mostrou-se apropriada para se trabalhar com a minimização dos custos da rede uma vez que os resultados obtidos eram baseados em diâmetros comerciais, o que até então tinha sido uma novidade em se tratando de otimização de redes de abastecimento. Outro ponto forte

do método proposto é a possibilidade de se trabalhar com diferentes condições de demandas da rede.

Melhorias do método de Alperovitz e Shamir (1977) foram feitas por diversos autores. Quindry, Brill, e Liebman (1981) propuseram uma formulação, após incorporar as correções na expressão do gradiente, utilizando as cargas nos nós como dados conhecidos ao invés das vazões. Fujiwara et al. (1987) apresentaram uma derivação completa das expressões do gradiente corrigido por Quidry et al. (1979), sugerindo o uso de um método quasi-Newton para determinar a direção do GFO e um método de busca unidirecional para a definição do “tamanho do passo” a ser adotado. Foi verificado que a solução final é muito sensível ao “tamanho do passo”, o que pode ser devido à existência de vários ótimos locais muito próximos. Kessler e Shamir (1989) propuseram a adoção do método do gradiente projetado para definição tanto da direção quanto do passo do GFO, obtendo então melhores resultados a partir da metodologia GPL.

Outros métodos que minimizam o custo da rede a partir da PL foram propostos por Bhave (1979), Bhave (1983a) e Bhave (1983b), que empregaram uma metodologia baseada na Teoria dos Grafos para definição dos caminhos críticos da rede de modo a seccioná-la transformando-a numa rede ramificada, que pode então ser otimizada através do método de Karmelli, Gadish e Meyers (1968). Esse método está restrito aos sistemas de distribuição que atuam por gravidade e que são abastecidos por uma única fonte.

Morgan e Goulter (1986) propuseram um método de dois estágios que utilizava a PL para determinar os comprimentos dos segmentos de trechos e uma ferramenta de análise hidráulica baseada no método de Cross (1936), para efetivar o balanço das vazões após cada estágio de otimização. Um procedimento semelhante foi adotado por Leal (1997), utilizando, no entanto, o método Granados (GRANADOS, 1990), de Programação Dinâmica (PD), como otimizador.

De um modo geral os modelos baseados na PL foram relegados ao segundo plano no final dos anos 1980 devido a alguns fatores:

- dificuldade de retratar linearmente o problema não linear de modo completo, sendo que, para a utilização dessa ferramenta, é necessária a inclusão de diversas aproximações;

- aparecimento de novos métodos de PNL que possibilitam trabalhar com restrições como por exemplo: Programação Quadrática Sequencial - SQP - (GILL, MURRAY e WRIGHT, 1984; SCHITTKOWSKI, 1985), Gradiente Reduzido Generalizado 2 - GRG2 - (LASDON ET AL. 1984).
- aumento excessivo do número de variáveis de decisão, para problemas de maior porte, uma vez que, ao se utilizar formulação de Karmelli, Gadish e Meyers (1968), são necessários cerca de cinco vezes mais variáveis para descrever o problema via PL;
- aumento considerável da capacidade dos computadores desde o início dos anos 1970, o que tornou possível utilização de métodos mais complexos que demandam maior capacidade computacional, o que era impraticável anteriormente.

2.1.4 Programação Não Linear com Restrições

O desenvolvimento de ferramentas de otimização baseados na PNL, foi um grande passo para os modelos de análise de SDA. Esse tipo de técnica possibilitou adicionar ao problema diversas nuances particulares às redes de abastecimento o que antes, com a PL, era difícil de se fazer. A PNL tornou possível trabalhar com diferentes características desses sistemas como: confiabilidade, vazamentos, demanda dirigida pela pressão, válvulas, etc. O enfoque que considera outros objetivos além da minimização dos custos, e que responde pela maioria dos trabalhos feitos com essa ferramenta, será foco de discussão do item (2.2) deste capítulo.

Os modelos de PNL, que trabalham explicitamente com restrições, tiveram seu desenvolvimento no início da década de 1990 utilizando métodos como a SQP (GILL, MURRAY e WRIGHT, 1984; SCHITTKOWSKI, 1985) e GRG2 (LASDON ET AL, 1984). De um modo geral, esses métodos apresentam vantagens – possibilidade de trabalhar diretamente com o problema sem a necessidade de se fazer aproximações – e desvantagens – dependência sobre valores iniciais e dificuldade de convergência em problemas descontínuos.

Varma, Narasimhan e Bhallamudi (1997) empregaram um método SQP em que consideravam os diâmetros da rede contínuos, que posteriormente eram convertidos para diâmetros comerciais através da substituição do diâmetro contínuo pelos imediatamente superior e inferior, de modo que a perda de carga no trecho não fosse alterada.

Formiga (1999) propôs um método composto por duas etapas. Na primeira etapa, efetuava-se um pré-dimensionamento, no qual os diâmetros dos tubos são considerados como variáveis de decisão. Em seguida, com os resultados obtidos a partir do pré-dimensionamento, era feito o ajuste da solução inicialmente obtida. Nesta segunda etapa o diâmetro contínuo calculado inicialmente para um determinado trecho é desdobrado em dois diâmetros comerciais, um imediatamente superior e outro imediatamente inferior, considerando como variáveis de decisão os comprimentos de seus sub-trechos, pertencentes ao trecho considerado, de modo semelhante ao método de Karmelli, Gadish e Meyers (1968). O método foi estendido posteriormente por Formiga e Gomes (1999) e Melo (2000) que incorporaram múltiplas condições de fontes de abastecimento e de demanda. A principal vantagem dessa metodologia é a redução do número de variáveis de decisão na segunda etapa em que se trabalha com diâmetros discretos. Além do mais, o método mostrou-se ainda capaz de encontrar bons resultados para a função objetivo, obtendo valores semelhantes aos provenientes de técnicas de otimização global.

A principal dificuldade dos métodos da PNL, com ou sem restrições, diz respeito à necessidade de bons valores iniciais para encontrar resultados satisfatórios, essa necessidade de valores iniciais aumenta à medida que o problema se torna mais complexo, envolvendo um maior número de nós e trechos (FORMIGA, 1999). Esse problema traz sérias restrições a aplicações dessa metodologia em problemas práticos, uma vez que os resultados obtidos, não são confiáveis, necessitando se fazer uma quantidade muito grande de testes com valores iniciais para que se possam ter resultados satisfatórios.

2.1.5 Otimização Global

Os métodos vistos até aqui, PL e PNL, apresentam como principais desvantagens respectivamente, a dificuldade de representar adequadamente redes mais complexas e a dependência da solução final dos valores iniciais, principalmente para problemas de médio e grande porte. Como não se garante que a resposta encontrada no processo de otimização seja a melhor solução, ou o *ótimo global*, para o problema, pesquisadores passaram a empregar técnicas mais eficazes para se obter esta solução. Essas técnicas fazem parte de um ramo da Pesquisa Operacional denominado *Otimização Global - OG - (Global Optimization)*.

Segundo Neumaier (2001), a OG é uma ferramenta capaz de determinar o conjunto absoluto de soluções admissíveis para encontrar a melhor solução que

atende um objetivo sob determinadas condições, assumindo que ambos possam ser expressos em termos matemáticos. Essa ferramenta é aplicada a problemas de difícil solução uma vez que existe uma lacuna entre as condições necessárias de otimalidade de Karush-Kuhn-Tucker e o conhecimento necessário das condições para se determinar o ótimo global.

Os métodos numéricos utilizados na Otimização Global podem ser classificados em três categorias: Métodos Heurísticos, Métodos de Aproximação e Métodos Sistemáticos (NEUMAIER, 2001).

- *Métodos Heurísticos*: essa classe contém as metodologias que não podem provar formalmente que se encontrou o ótimo global considerando uma quantidade predefinida de passos ou iterações. Embora, muitas vezes, a solução encontrada seja o ótimo global, não é possível garantir a convergência da mesma. A maioria dos métodos que se enquadram nessa categoria são os chamados métodos estocásticos, um exemplo dessa classe são os *Algoritmos Genéticos*.
- *Métodos de Aproximação*: nessa categoria se enquadram os métodos que transformam o problema original, por meio de aproximações em um problema de otimização “mais tratável”. A solução encontrada é uma aproximação da solução do problema original, e caso esteja suficientemente próxima do ótimo global, a aplicação de um método de otimização local, como a PL ou PNL, permitirá encontrar a melhor solução geral do problema. Um método que se enquadra nessa classe é o *Mixed Integer Linear Program* (MILP).
- *Métodos Sistemáticos*: englobam todos aqueles que podem garantir ter encontrado o ótimo global do problema após um número determinado de operações. Esta garantia só está presente em problemas que tem as características de otimalidade conhecidas, sendo que, mesmo neste caso, a quantidade de operações necessárias tende a crescer exponencialmente com o tamanho do problema tratado. Para que se possa garantir que os métodos sistemáticos irão convergir em um número limitado de operações, é preciso ter acesso, em maior ou menor escala, a informações do problema. Quando se trabalha com funções do tipo “caixa preta”, é difícil definir o número de iterações ou passos necessários à convergência para o ótimo global, pois não se pode afirmar, com certeza, que o mesmo foi alcançado, com isso se faz

necessário adotar um critério de parada, como nos demais algoritmos. Os *métodos bifurcação e limite (branch and bound)* são exemplos de métodos sistemáticos.

Embora na maioria dos problemas não seja possível garantir formalmente que a solução encontrada é o ótimo global, os métodos OG, são capazes de encontrar soluções muito próximas do mesmo, senão o próprio. De um modo geral, as soluções encontradas pelos métodos sistemáticos são mais confiáveis do que a dos métodos heurísticos, devido à forma com que estes delimitam o problema e executam a busca, porém necessitam, na maioria dos casos, de uma quantidade de processamento computacional maior do que os algoritmos heurísticos, podendo ter ainda problemas de convergência quando se otimiza redes mais complexas (LOPES, 2003).

Devido à natureza das funções envolvidas na minimização dos custos em RDAs, os métodos de OG passaram a ser uma alternativa viável para a determinação da solução desse tipo de problema. A partir de meados da década de 1990, diversas técnicas OG foram aplicadas ao problema de minimização dos custos das redes de abastecimento, a saber: Métodos *Branch and Bound* (EIGER, SHAMIR e BEN-TAL, 1994; SHARALI, TOTLANI e LOGANATHAN 1998; COSTA MEDEIROS e PESSOA, 2001; LOPES, 2003), Algoritmos Genéticos (SIMPSON, DANDY e MURPHY, 1994; SAVIC e WALTERS, 1997), *Simulated Annealing* (CUNHA e SOUZA, 1999), Colônia de Formigas – *Ant Colony Optimization* - (MAIER ET AL., 2001; MAIER ET AL. 2003), *Shuffled Frog Leaping Algorithm* (EUSUFF E LANSEY, 2001; EUSUFF E LANSEY 2003, LIONG E ATIQUZZAMAN, 2004).

Desenvolve-se, a seguir, uma breve revisão dos principais trabalhos na área de otimização de RDAs versando sobre alguns desses métodos.

2.1.5.1 Métodos Bifurcação e Limite (*Branch and Bound*)

Os métodos *branch and bound* denotam a classe de algoritmos que dividem recursivamente o problema principal em subproblemas que podem ser posteriormente eliminados, caso em um subproblema não se possa alcançar um ponto melhor do que o alcançado em outro subproblema. Este ponto é checado calculando-se os chamados limites inferiores (*lower bounds*) da função objetivo na região do subproblema. Um novo procedimento, baseado em regras de ramificação (*branching rules*), divide novamente os subproblemas resultantes. O processo é repetido até que se atenda a algum critério de parada pré-estabelecido.

Um dos primeiros trabalhos, a empregar o método *branch and bound* no dimensionamento de RDAs, foi proposto por Eiger, Shamir e Ben-Tal (1994). Este trabalho se baseou na formulação dual de Alperovitz e Shamir (1977), as variáveis adotadas para serem os limites do problema (*bounds*) foram as vazões nos trechos. Com essa consideração pôde-se continuar utilizando a PL como ferramenta de busca local. Sharali, Totlani e Loganathan (1998) usam um esquema heurístico de relaxação dos limites das vazões nos trechos tomando por base as velocidades máximas e mínimas admissíveis, reduzindo o número de subproblemas a serem reduzidos. Costa Medeiros e Pessoa (2001) desenvolveram um método semelhante ao de Sharali, Totlani e Loganathan (1998), modificando-se entretanto o algoritmo de ramificação (*branch*), o que permitiu uma redução de mais de 50% no número de subproblemas resolvido.

2.1.5.2 Algoritmos Evolucionários

Os Algoritmos Evolucionários (AEs) são ferramentas de busca estocástica que têm por base a seleção natural das espécies, e utilizam mecanismos de evolução das populações, como cruzamento (ou reprodução) e mutação, para encontrar a melhor solução para diversos tipos de problema. Os Algoritmos Genéticos (AGs) são os mais conhecidos membros dessa classe e têm sido amplamente empregados na análise dos diversos problemas inerentes às RDAs, dentre eles a minimização dos custos. Os AGs são a base da metodologia de otimização que será utilizada neste trabalho e serão melhor detalhados nos Capítulos III e IV.

Segundo Neumaier (2001), os AGs, como a maioria dos métodos heurísticos, são ferramentas de otimização que têm sua aplicação a problemas com contornos ou restrições simples, uma vez que estes são algoritmos de otimização irrestrita. Não sendo possível trabalhar diretamente com restrições, estas são adicionadas ao problema através de penalidades na função objetivo. Nesses problemas, o esquema de solução adotado foi o proposto por Shamir (1974) em que os algoritmos de otimização e de simulação hidráulica são duas rotinas separadas. Como nos problemas de otimização irrestrita, a principal dificuldade é definir o fator de penalidade de modo que o método convirja ao ótimo de maneira mais eficiente.

Uma das primeiras aplicações dos AGs às redes de distribuição de água foi feita por Simpson, Dandy e Murphy (1994), em que uma técnica básica de AGs foi aplicada à reabilitação de uma rede proposta por Gessler (1985). Dandy, Simpson e

Murphy (1996) aperfeiçoaram os mecanismos de seleção, cruzamento e seleção desse método. Savic e Walters (1997) desenvolveram um algoritmo, denominado GANET, em que a principal inovação um fator de penalidade que tende a aumentar com o número de gerações da população. Esse fator se mostrou eficiente na incorporação de diversos tipos de restrições. Savic e Walters (1997) aplicaram sua metodologia a diversos problemas de dimensionamento de redes tendo obtido excelentes resultados.

Nos últimos anos vários trabalhos foram desenvolvidos considerando os AGs, sendo que a grande maioria destes refere-se a aplicações de novos métodos ou mecanismos mais modernos de AGs como por exemplo os trabalhos de: Montesinos, Guzman e Ayuso (1999), Gupta e Kahna (1999) e Gameiro (2003). Entretanto nenhuma evolução na metodologia em si, em aplicações dos AGs ao dimensionamento de RDAs, foi introduzida.

2.1.5.3 Simulated Annealing

Outro tipo importante de método heurístico é o *Simulated Annealing* (SA), que explora uma analogia entre o modo como um metal se resfria resultando numa estrutura cristalina de energia mínima (o processo real de annealing) e a busca por um mínimo de um sistema qualquer. O SA, a cada iteração, procura o próximo candidato a ser ponto de mínimo na vizinhança do candidato corrente, com base na diferença entre os valores da função-objetivo (chamada, nesse contexto, de função de energia ou potencial). O SA tem como vantagem a possibilidade de evitar mínimos locais, empregando para isso uma busca aleatória que, por vezes, aceita vizinhos com "nível de energia" (ou valor da função objetivo) mais elevada. No entanto, a probabilidade de se aceitar um vizinho de maior energia decresce à medida que o número de interações aumenta, ou a temperatura do metal diminui.

O método SA foi empregado no dimensionamento econômico de RDAs por Cunha e Souza (1995), na otimização de duas redes tradicionais da literatura, sendo que os resultados encontrados foram semelhantes aos obtidos por outras técnicas de otimização global, porém a necessidade de processamento expressa pelo número de avaliações da função objetivo para o mesmo problema foi relativamente maior do que as necessárias quando do emprego de AGs.

2.1.5.4 Outros Métodos de Otimização Global

Ao longo dos últimos cinco anos diversos métodos de otimização global têm sido aplicados no intuito de encontrar o custo mínimo de sistemas de distribuição de

água. Estes são, em grande parte, adaptações e/ou melhoramentos dos conceitos dos métodos evolucionários. Dentre as metodologias empregadas no dimensionamento de RDAs merecem destaque os Algoritmos Meméticos (AM).

De um modo simplista, pode-se definir os AMs como sendo AGs acoplados com um método de busca local. No entanto, a teorização por trás dos AMs reflete um avanço em relação aos AGs tradicionais.

Algoritmos Genéticos e Meméticos baseiam-se em processos naturais, tais como recombinação, seleção e mutação. O princípio básico destes métodos consiste em selecionar bons indivíduos, identificados como as soluções do problema de otimização com menor custo, para reprodução, e recombinação com o propósito de obter soluções melhores que as soluções originais. Essas novas soluções, por sua vez, tendem a ocupar o lugar das "menos adaptadas", melhorando a qualidade do conjunto como um todo. A mutação entra como um elemento adicionador de variedade.

A diferença básica entre os dois métodos se dá nos mecanismos de transmissão de informação entre as soluções, genes, no caso dos AGs, e memes nos AMs. Enquanto que os genes só podem ser transmitidos por dois pais para a sua prole, e isso ocorre somente entre duas gerações, os memes podem ser transmitidos, em princípio entre quaisquer dois indivíduos, sendo que a capacidade de transmissão dessa informação é praticamente ilimitada, podendo ser compartilhada por um grande número de indivíduos (EUSUFF e LANSEY, 2003).

Algoritmos Meméticos utilizam o conceito de "evolução cultural", onde a adaptabilidade de uma alternativa pode ser modificada no decorrer de sua existência dentro do conjunto de soluções. Assim conceitualmente dentro de um AM, mesmo que um indivíduo possa ser geneticamente pouco favorecido ao nascer, devido às condições em que vive, por trocas de informação com outros indivíduos, experiências pessoais, entre outros aspectos, ele pode se tornar mais adaptado, e mais do que isso, transmitir essa experiência aos seus descendentes (MENDES, 1999).

Dois tipos de AMs aplicados à determinação do projeto custo mínimo de redes são o "*Shuffled Frog Leaping Algorithm*" - SFLA- (tradução livre: Algoritmo Expandido do Pulo do Sapo) proposto Eberhart e Kennedy (1995) e o "*Ant Colony Optimization*" - ACO - (tradução livre: otimização baseada em colônia de formigas) de Dorigo Maniezzo e Colomi (1991).

O SFLA empregado por Eusuff e Lansey (2002) e Eusuff e Lansey (2003), procura simular o comportamento de sapos em busca de comida em um pântano

como forma de se executar uma busca para a determinação do ótimo de uma função. Esse algoritmo foi aplicado a três redes freqüentes na literatura. Os resultados encontrados por esses trabalhos foram muito próximos dos obtidos por outros autores, porém mostrando ser mais eficiente na busca da solução ótima.

A outra técnica que pode ser classificada como AM aplicada na otimização de redes de distribuição é a ACO. Esse método que foi desenvolvido inicialmente para problemas de definição de roteiros, como do caixeiro viajante (SILVA, 2003), foi adaptado por MAIER et. al. (2003) na otimização de duas redes, obtendo-se novamente resultados próximos aos encontrados em outros trabalhos aos quais foram comparados. No entanto, o ganho computacional foi pequeno, quando comparado com AGs tradicionais.

Por possuir a mesma estrutura dos AGs, os AMs têm as mesmas desvantagens, sendo a principal delas, a necessidade de se colocar na função objetivo original uma formulação de penalidades de modo a se considerar as restrições do problema.

2.1.6 Considerações Sobre os Métodos de Otimização do Custo

Ao longo das últimas três décadas diversas técnicas de otimização foram empregadas para a determinação do custo ótimo do projeto de redes de distribuição de água. É inegável o avanço ocorrido na área em que muitas metodologias de otimização foram aplicadas ao problema quase que imediatamente após o seu surgimento. No entanto, a aplicação de técnicas tão sofisticadas a um problema que, sob o ponto de vista do resultado final, parece resolvido, não passa de um exercício de fundo acadêmico, que busca melhorar a forma de se encontrar esse resultado.

Essas metodologias apresentaram uma boa adaptabilidade aos problemas propostos, entretanto, a maioria dos sistemas relatados pelos trabalhos diz respeito a redes de pequeno porte, não havendo, para a maioria dos métodos, aplicações a redes maiores.

Não se critica, o fato de aplicar uma metodologia nova ao problema do dimensionamento de redes, pois é necessário fazer uma adaptação do método e comparar os resultados para fins de validação do mesmo, o que se questiona é que não se tem vislumbrado o passo seguinte que seria a aplicação a problemas reais de maior porte.

Ademais, a maior lacuna dos métodos de dimensionamento baseados somente em critérios econômicos, diz respeito às respostas encontradas. Na formulação do problema sob o aspecto de minimização dos custos de construção, o modelo procurará, obedecendo as restrições impostas, a rede que satisfaça a condição de menor custo. Ao se considerar a formulação de Jacoby (1968) ou suas adaptações, a rede obtida por qualquer processo de otimização empregado tenderá a ser uma rede ramificada, o que ficou comprovado nos trabalhos supracitados neste item.

As redes de distribuição podem ser classificadas em ramificadas, malhadas e mistas. O traçado da rede, geralmente, é definido pelas ruas, grau de desenvolvimento do local, topografia e localização das fontes de abastecimento, tratamento e unidades de armazenamento.

As redes ramificadas são caracterizadas por terem seus trechos conectados em forma de árvore, onde a raiz, no caso é a fonte de abastecimento. Esse tipo de topologia é utilizado em regiões pouco povoadas, com uma distribuição dos pontos de consumo esparsa como as zonas rurais. As redes malhadas, por sua vez, são utilizadas em regiões urbanas por possuírem uma redundância maior do que as primeiras. Essa redundância permite, por exemplo, que a rede continue funcionando, mesmo quando há falha num dado trecho. Isto não é possível para os sistemas ramificados, pois neste caso, quando um trecho entra em colapso, o abastecimento a jusante do mesmo é interrompido.

Por prerrogativa do serviço, as redes de abastecimento de água devem ser *malhadas* entre outros motivos, pelas seguintes características (ROWELL e BARNES, 1982):

- provêem um caminho alternativo para a água no caso de falhas de algum componente do sistema
- reduz a estagnação nos nós de ponta promovendo uma melhor circulação da água
- retarda a acumulação de sedimentos no sistema
- facilita a limpeza dos tubos.

No entanto, ao se comparar uma rede malhada com uma ramificada de mesmo porte, ou seja, que atenda as mesmas demandas nos mesmos pontos, a primeira apresenta um custo maior do que a segunda. Com isso, no problema de otimização do custo, a solução será impreterivelmente uma rede de custo mínimo que teria característica de uma rede ramificada.

Esses resultados próprios da formulação do problema inviabilizam a sua utilização em aplicações práticas. Dessa forma, tem que se a otimização de sistemas de distribuição de modo que o resultado seja uma rede possa atender, mesmo que em parte, às demandas mesmo em caso de quebra de algum componente e que atenda também ao critério de custo mínimo. Para alcançar esse objetivo, foram propostas metodologias apresentadas nos itens a seguir.

2.2 Otimização de Custo com Restrições de Confiabilidade

O dimensionamento ótimo de RDAs considerando apenas a minimização do custo como objetivo tem se mostrado um campo de pesquisa para novos métodos de otimização que podem ser empregados na Análise de Sistemas aplicada a redes de distribuição de água. Entretanto, esse tipo de abordagem tem pouca aplicação à resolução de problemas práticos servindo somente para aferição da aplicação de uma metodologia, visto que os resultados encontrados por aqueles métodos tendem a ser redes ramificadas, conforme visto no item 2.1.6.

Como no projeto de redes de abastecimento de água não se tem controle nem sobre as demandas nem sobre a confiabilidade individual dos componentes, o aumento ou diminuição da confiabilidade da rede, será função da configuração adotada para as diferentes partes do sistema. A confiabilidade de um SDA é função de diversos fatores como: tipo do material da tubulação; método de construção empregado; existência de regras operacionais para emergência; e redundância dos componentes, entre outros (GOUTER ET AL. 1999).

Embora a escolha do componente faça parte do projeto, ela está bem mais amarrada aos diâmetros que se quer empregar, e/ou a classe de pressão de tubos do que propriamente uma alternativa. Por exemplo, para tubulações de redes de até 400 mm, tende-se a empregar hoje em dia tubos de PVC; acima desse diâmetro usa-se mais comumente tubos de ferro dúctil (YSUSI, 1999). Assim o único fator que pode ser considerado efetivamente na fase de projeto de uma RDA é a sua redundância (FUJIWARA e DE SILVA, 1990), ou seja, a capacidade que um sistema tem de funcionar sob condições desfavoráveis, como demandas maiores que as de projeto, ou a quebra de algum componente.

A redundância de uma RDA pode ser conseguida de duas formas:

- aumento das conexões entre os nós e/ou;
- super-dimensionamento dos componentes;

A primeira forma se refere a aumentar o nível de conectividade da rede, isso é feito colocando-se trechos extras para conectar os nós dividindo em vários caminhos a vazão necessária para atender a demanda. Essa divisão é eficaz quando da ocorrência de quebra em algum trecho, fazendo com que o abastecimento no nó não seja completamente interrompido. Se um sistema é dimensionado para atender somente as condições de carga de projeto, quando da ocorrência de uma sobrecarga, seja devido a um aumento de demanda seja pela necessidade de se transportar mais água em consequência da falha de um componente, este sistema não será capaz de atender as demandas impostas. Dessa forma, procura-se projetar as RDAs com um certo nível de "folga" (FUJIWARA E TUNG, 1991).

Vários trabalhos nas duas últimas décadas procuraram introduzir cientificamente modos de se aumentar a confiabilidade das redes no processo de dimensionamento ótimo das mesmas. Uma visão geral desses trabalhos será apresentada nesse item. Porém, antes de se fazer uma revisão dos principais métodos de otimização de redes considerando-se a confiabilidade, serão abordados alguns conceitos necessários à compreensão do tema.

2.2.1 Conceitos Básicos de Confiabilidade

Confiabilidade: é definida como a probabilidade que um sistema possui de não apresentar falha em um determinado intervalo de tempo $(0,t)$, dado que este componente pode ser considerado novo no instante 0 . Matematicamente pode-se definir a confiabilidade (CF) como sendo (MAYS, TUNG e CULLINANE, 1989):

$$CF(t) = \int_t^{\infty} f(t)dt \quad (2.7)$$

onde $f(t)$ é a função densidade de probabilidade de falha do componente, estimada através de dados de falhas desses equipamentos utilizando-se de métodos estatísticos para determinar o tipo de função, bem como os seus momentos. Para a maioria dos equipamentos, uma distribuição exponencial simples é considerada apropriada (MAYS, TUNG e CULLINANE, 1989).

Risco: é a probabilidade de um componente apresentar um colapso no intervalo de tempo $(0,t)$. O risco (rs) pode ser expresso como (MAYS, TUNG e CULLINANE, 1989):

$$rs(t) = \int_0^t f(t)dt = 1 - conf(t) \quad (2.8)$$

A Figura 2.2 expressa graficamente os conceitos de confiabilidade e risco.

Tempo Médio para Falha (TMF): é expresso por:

$$TMF = \int_0^{\infty} tf(t)dt \quad (2.9)$$

A probabilidade do reparo do componente ser efetuado antes do tempo t' , dado que houve falha no tempo 0 , que pode ser expressa matematicamente por:

$$rp(t) = \int_0^{t'} r(t)dt \quad (2.10)$$

em que $r(t)$ é a função densidade de probabilidade do reparo, podendo ser também considerada como sendo exponencial.

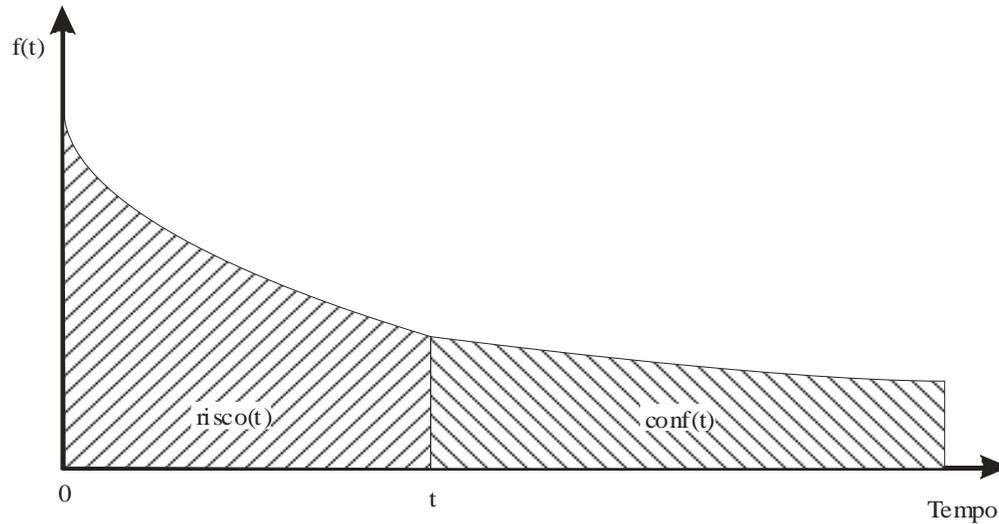


Figura 2.2 - Função densidade de probabilidade exponencial mostrando a confiabilidade e o risco

Tempo Médio de Reparo (TMR): pode ser, então ser expresso como sendo:

$$TMR = \int_0^{\infty} tr(t)dt \quad (2.11)$$

Tempo Médio entre Falhas: pode-se calcular o *tempo médio entre falhas* que será a soma de TMF e TMR, ou:

$$TMEF = TMF + TMR \quad (2.12)$$

2.2.2 Confiabilidade em Redes de Distribuição de Água

A definição formal de confiabilidade de um componente serve para medir a probabilidade deste componente funcionar continuamente sem interrupção durante um período de tempo $(0,t)$. Este tipo de medida é apropriado para caracterizar

componentes não-reparáveis, ou descartáveis, que devem ser substituídos quando da ocorrência falha. Entretanto, em sistemas de distribuição de água, os componentes podem ser reparados e voltar novamente a funcionar. Assim, é necessário adotar um outro tipo de medida que considere a operação de reparo e volta à operação do sistema, e/ou o nível de atendimento das demandas mesmo quando o sistema encontra-se em situação de falha.

Para considerar essas ocorrências a definição de confiabilidade, também chamada de disponibilidade (CULLINANE, 1989), utilizada neste trabalho será a probabilidade de um componente qualquer se encontre em *condição operacional*, dado que esteja como novo no tempo zero.

Os sistemas de abastecimento de água são compostos por três partes: estações de bombeamento, unidades de armazenamento e redes de distribuição (CULLINANE, GOODRICH e GOULTER, 1989). Essas partes podem ser divididas em componentes, que por sua vez, podem ser subdivididos ainda em sub-componentes. A definição exata de componentes, sub-componentes e sub-subcomponentes depende, fundamentalmente do nível de detalhe requerido para análise do sistema, bem como, dos dados disponíveis para quantificá-los. Embora as confiabilidades das estações de bombeamento e dos reservatórios sejam importantes, a maioria dos eventos relacionados a essas partes do sistema são mais previsíveis e/ou de solução rápida.

No caso dos reservatórios, os eventos de manutenção são as principais causas de falha, enquanto que as estações de bombeamento têm sempre a disposição um conjunto motor-bomba reserva capaz de entrar imediatamente em operação caso outro conjunto entre em colapso ou esteja sendo reparado, reduzindo significativamente o nível de interrupção deste serviço. Por outro lado, as falhas relativas às redes de distribuição de água decorrem de quebras não previstas das tubulações, que, de um modo geral, demoram a ser detectadas e/ou reparadas, devendo a rede funcionar sem a mesma durante horas, ou até dias. Por apresentar características de confiabilidade diferentes dos outros componentes do sistema, tanto do ponto de vista de causa quanto da magnitude, o foco desse trabalho serão somente as redes de distribuição de água, uma vez que o objetivo deste trabalho é a otimização desta parte do sistema.

As redes urbanas de distribuição de água têm por característica a possibilidade de continuar funcionando, mesmo quando da ocorrência de quebra de algum componente. Dessa forma, a medida de sua confiabilidade deve ser avaliada

conjuntamente a possibilidade de uma tubulação vir a permanecer incapacitada e o impacto desse evento sobre a rede. Assim, a confiabilidade de uma RDA é fruto da junção de dois fatores: *confiabilidade mecânica* e *capacidade de atendimento* do sistema quando da ocorrência de falhas.

2.2.2.1 Confiabilidade Mecânica (CM)

As redes de distribuição são a parte mais complexa dentro de um sistema de abastecimento de água. Tal complexidade advém do alto grau de interconectividade dos seus subcomponentes, uma vez que não se pode afirmar se esses subcomponentes estão localizados em série ou paralelo, podendo, em função da configuração das vazões, ambas as alternativas serem possíveis (CULLINANE, 1989).

A formulação de CM em RDAs é desenvolvida levando-se em conta apenas a tubulação como fator de influência e dissociando-a do restante do sistema onde fatores como armazenamento e confiabilidade do sistema de bombeamento são importantes. Um estudo sobre a confiabilidade desses componentes do sistema é feito por Hobbs e Beim (1988) e Beim e Hobbs (1988).

Segundo Shinstine, Ahmed e Lansey (2002), a confiabilidade mecânica de uma tubulação é avaliada individualmente, tubo por tubo, sob a suposição de que a possibilidade da quebra desses é independente. Considerando que para um i -ésimo componente sejam conhecidos os valores de TMF e TMR, o valor de CM pode ser então expresso como sendo:

$$CM_i = \frac{TMF_i}{TMF_i + TMR_i} = \frac{TMF_i}{TMEF_i} \quad (2.13)$$

Analogamente, o risco (RM_i) de uma tubulação i falhar será:

$$RM_i = 1 - CM_i = 1 - \frac{TMF_i}{TMF_i + TMR_i} = \frac{TMR_i}{TMF_i + TMR_i} \quad (2.14)$$

Seja uma RDA composta por NT tubos, a probabilidade da mesma estar funcionando com todos os seus componentes, isto é, com todas as tubulações funcionando, é expressa pelo produto dos valores da confiabilidade de cada componente, ou seja:

$$CM_{TOT} = \prod_{i=1}^{NT} CM_i \quad (2.15)$$

A probabilidade de que apenas um tubo i esteja quebrado (pf_i), permanecendo todos os outros componentes em operação será (FUJIWARA e DE SILVA, 1990):

$$pf_i = CM_{TOT} \frac{RM_i}{CM_i} \quad (2.16)$$

Semelhantemente, a probabilidade de que apenas dois tubos (i e j) não estejam operacionais será (SHINSTINE, AHMED e LANSEY, 2002):

$$pf_{ij} = CM_{TOT} \frac{RM_i}{CM_i} \frac{RM_j}{CM_j} \quad (2.17)$$

Tanyimboh Tabesh e Burrows (2001), estenderam essa definição para um conjunto qualquer de tubos \mathbf{S} com NS componentes. A probabilidade de que apenas os componentes pertencentes a \mathbf{S} não estejam operacionais será:

$$pf(\mathbf{S}) = CM_{TOT} \prod_{k \in \mathbf{S}} \frac{RM_k}{CM_k} \quad (2.18)$$

2.2.2.2 Capacidade de Atendimento (CA)

A capacidade de atendimento (CA) pode ser definida como sendo a aptidão de uma rede de distribuição de água atender as demandas, com uma pressão mínima e com um nível aceitável de interrupção, quando da ocorrência de eventos anormais, tais como vazões máximas e falhas de componentes.

A avaliação da CA pode ser feita considerando diferentes medidas como: a relação do volume de água demandado e o suprido; a pressão nos nós; o tempo que os nós são plenamente atendidos; além da própria localização dos pontos a serem abastecidos (MAYS, TUNG e CULLINANE, 1989).

É importante ressaltar que a CA é uma medida diferente da confiabilidade hidráulica (CH) do sistema. A capacidade de atendimento indica apenas o quanto a rede pode atender às demandas em uma determinada situação. A confiabilidade hidráulica está relacionada com a probabilidade das demandas estarem sendo atendidas em qualquer instante, sendo necessário para a sua determinação efetuar o cálculo da CA em diversas situações.

A CH é uma medida mais abrangente utilizada para se avaliar a capacidade de uma rede funcionar sob diferentes condições e sofre influência de diversos fatores como:

- configuração do sistema, incluindo o grau de conectividade e dimensão dos seus componentes;
- confiabilidade individual dos componentes do sistema;
- variação espacial da demanda;
- variação temporal da demanda.

A CA, que é uma medida importante para o cálculo da CH, é obtida considerando a rede em uma determinada situação de carga e de configuração de tubos. No caso das RDAs, esta medida não é feita diretamente, pois, devido à natureza das equações a serem resolvidas, é preciso empregar algum algoritmo de análise hidráulica de redes para tanto.

As redes de distribuição de água são formadas por um conjunto de trechos que se conectam uns aos outros em locais denominados nós. Embora, na prática a demanda seja distribuída ao longo de um trecho, adota-se, para fins de cálculo, que seja concentrada em nós. A partir dessa suposição, pode-se admitir duas diferentes formas de avaliar a CA em uma rede (GUPTA e BHAVE, 1994). Na primeira delas, a capacidade de atendimento da rede é medida considerando o(s) nó(s) mais crítico(s) da rede. Esse critério, embora conservador, garante que nenhum nó será negligenciado no dimensionamento da rede. Outra maneira é considerar o nível de atendimento do sistema, em que se mede não apenas a confiabilidade do nó mais crítico, mas de todos os nós que compõem a rede. A medida ideal seria aquela que considerasse tanto a confiabilidade pontual quanto à confiabilidade média do sistema.

Um ponto importante no cálculo da CA de um nó é definir quando este apresenta uma falha. Diferentemente do que ocorre com os componentes mecânicos que podem apresentar duas situações (estado operacional ou não-operacional), o conceito de falha no abastecimento é mais complexo. Tradicionalmente, utiliza-se o conceito que um nó falhou quando o sistema não foi capaz de atender à demanda com um determinado nível mínimo de pressão. Tomando-se por base a definição de CA, é possível expressá-la matematicamente da seguinte forma:

$$CA_j = \sum_{p=1}^M \frac{fa_{ij} t_p}{T} \quad (2.19)$$

em que CA_j é a capacidade do sistema atender as vazões do nó j ; t_i é o período de tempo p ; T é o período total de tempo considerado; M é o número de períodos

considerados; fa_{ij} é fator de atendimento do nó j no período i , que obedece a seguinte regra:

$$\begin{aligned} fa_{ij} &= 0 & \text{se } P_{ij} < P_j^{\min} \\ fa_{ij} &= 1 & \text{se } P_{ij} \geq P_j^{\min} \end{aligned} \quad (2.20)$$

sendo P_{ij} a pressão no nó j no período i ; e P_j^{\min} a pressão mínima do nó j ;

A capacidade de atendimento do sistema é dada por:

$$\overline{CA} = \sum_{j=1}^{NN} \frac{CA_j}{NN} \quad (2.21)$$

em que NN é o número total de nós da rede.

A utilização desse critério para computar a falha hidráulica é passível de críticas, pois mesmo que a pressão em um determinado nó esteja abaixo daquela requerida, isto não indica que nenhuma demanda seria atendida. Assim, segundo esse critério não existe diferenciação se a pressão encontrada para o nó foi 1% ou 99% da desejável. Para superar esse problema, alguns trabalhos, (CULLINANE, MAYS e LANSEY, 1992; FUJIWARA e GANESHARAJAH, 1993; BAHVE E GUPTA, 1994, TANYIMBOH TABESH e BURROWS, 2001; SHINSTINE, AHMED e LANSEY, 2002, entre outros) passaram a utilizar uma flexibilização para calcular o fator atendimento da Eq. 2.19.

Uma das primeiras formas de flexibilizar o fator de atendimento foi proposta por Cullinane, Mays e Lansey (1992). Neste trabalho foi empregada uma função “fuzzy” contínua para relacionar a pressão no nó e o fator de atendimento de modo a se obter valores intermediários para fa que não apenas 0 ou 1. A função escolhida a distribuição cumulativa normal, que é expressa como:

$$fa_i = p(P_j^{req} \leq P_j) = \int_{-\infty}^{\frac{P_j - \mu P_j}{\sigma P_j}} e^{-x^2} dx = p \left[\frac{P_j - \mu P_j}{\sigma P_j} \right] \quad (2.22)$$

em que: $p(\)$ é a probabilidade de que um evento venha a ocorrer; P_j é a pressão no nó j ; μP_j e σP_j representam a média e o desvio padrão da pressão no nó, e são os parâmetros usados para o ajuste da função.

Por trabalhar diretamente com uma medida de pressão no nó essa formulação pode usar diretamente qualquer programa de análise hidráulica disponível como EPANET (ROSSMAN, 2000).

Embora seja um avanço em relação à binária, a consideração da pressão como delineador no cálculo de *fa* não expressa completamente a situação do sistema quando do não atendimento de um determinado nível de pressão.

A finalidade básica dos sistemas de distribuição de água é transportar água de um lugar para o outro, garantindo que esta chegue em quantidade ao usuário final. Para tanto, é necessário que ao estar disponível ao consumidor exista ainda uma sobra de energia que será necessária para superar as perdas de carga dentro dos imóveis. Se a pressão não for adequada a quantidade de água suprida será menor do que aquela requerida, mas, não será nula, havendo então um atendimento parcial das demandas. No entanto, se a pressão estiver abaixo de determinado valor, que depende de cada caso, não haverá suprimento de nenhuma demanda.

Ao se tentar modelar este comportamento, deve-se procurar levar em consideração além da pressão, a diminuição das demandas atendidas e, conseqüentemente, das vazões nos trechos, o que modifica em parte o cenário que se está simulando. A forma de se considerar esse aspecto é considerar a demanda também como uma variável, que teria o seu valor calculado em função da pressão nos nós. A demanda determinada por formulações que procuram modelar esse comportamento são denominadas de *demanda dirigida pela pressão*.

Em geral, os programas de análise hidráulica consideram as demandas como constantes. Para se simular uma rede considerando a demanda como variável é necessário modificar essas rotinas de análise. Sem dúvida, esta é a principal dificuldade enfrentada para se empregar esse tipo de modelagem. A seguir serão apresentadas algumas das várias formulações já empregadas no cálculo da demanda dirigida pela pressão.

Germanoupolos (1985) foi um dos primeiros a considerar a demanda como função da pressão, sugerindo a seguinte expressão:

$$\begin{aligned}
Q_j^{Dem} = 0 & \Rightarrow h_j \leq h_j^{min} \\
Q_j^{Dem} = Q_j^{req} \left[1 - 10^{-c_j \frac{(h_j - h_j^{min})}{(h_j^{req} - h_j^{min})}} \right] & \Rightarrow h_j^{min} < h_j < h_j^{req} \\
Q_j^{Dem} = Q_j^{req} & \Rightarrow h_j \geq h_j^{req}
\end{aligned} \tag{2.23}$$

em que Q_j^{Dem} é a demanda atendida; Q_j^{req} é a demanda requerida; c_j é uma constante do nó; h_j é a carga hidráulica no nó j ; h_j^{min} é a carga hidráulica mínima necessária para que alguma demanda seja suprida; h_j^{req} é a carga hidráulica requerida para que a demanda seja completamente suprida.

Reddy e Elango (1989) propuseram a seguinte relação que considera a demanda no nó como tendo um comportamento semelhante a um orifício:

$$Q_j^{Dem} = c_j (h_j - h_j^{min})^{\frac{1}{2}} \Rightarrow h_j^{min} < h_j < h_j^{req} \tag{2.24}$$

sendo c_j uma constante do nó.

Wagner, Shamir e Marks (1998b) e Chandapilai (1991) propuseram uma relação parabólica para representar a relação entre a demanda atendida e a carga hidráulica no nó, que é dada por:

$$Q_j^{Dem} = Q_j^{req} \left(\frac{h_j - h_j^{min}}{h_j^{req} - h_j^{min}} \right)^{\frac{1}{n}} \Rightarrow h_j^{min} < h_j < h_j^{req} \tag{2.25}$$

Fujiwara e Ganesharajah (1993) utilizaram a seguinte relação para relacionar a demanda com a pressão em um nó da rede:

$$\begin{aligned}
Q_j^{Dem} = 0 & \Rightarrow h_j \leq h_j^{min} \\
Q_j^{Dem} = Q_j^{req} \frac{\int_{h_j^{min}}^{h_j} (z - h_j^{min})(h_j^{req} - z) dz}{\int_{h_j^{min}}^{h_j^{req}} (z - h_j^{min})(h_j^{req} - z) dz} & \Rightarrow h_j^{min} < h_j < h_j^{req} \\
= Q_j^{req} \frac{(h_j - h_j^{min})^2 (3h_j^{req} - 2h_j - h_j^{min})^2}{(h_j^{req} - h_j^{min})^3} & \\
Q_j^{Dem} = Q_j^{req} & \Rightarrow h_j \geq h_j^{req}
\end{aligned} \tag{2.26}$$

Gupta e Bhave (1996) fizeram um comparativo de diferentes técnicas que calculam a demanda como dependente da pressão, verificando que, para o caso analisado, os métodos parabólicos foram os que apresentaram melhores resultados.

Sendo conhecida a vazão a ser atendida em caso de eventos anormais, como quebra de tubulações e/ou demandas muito grandes, pode-se medir a performance do sistema e assim determinar o seu grau de atendimento. Existem basicamente três procedimentos para se calcular a disponibilidade hidráulica de um sistema. Os dois primeiros são semelhantes ao visto na abordagem anterior, diferindo apenas na atribuição do valor de fa_{ij} que passaria a ser expresso como função da relação entre a demanda atendida e a esperada. Ou seja:

$$fa_j = \frac{Q_j^{Dem}}{Q_j^{req}} \quad (2.27)$$

O terceiro critério refere-se a uma medida do déficit volumétrico (GUPTA e BHAVE, 1994). Essa metodologia seria uma espécie de média ponderada das confiabilidades hidráulicas dos nós, considerando como os mais relevantes aqueles que apresentam maiores vazões, ou seja:

$$\overline{CA} = \frac{\sum_{j=1}^{NN} \sum_{i=1}^T \frac{Q_j^{Dem} t_i}{Vol_{tot}^{req}}}{\sum_{j=1}^{NN} \sum_{i=1}^T \frac{Q_j^{req} t_i}{Vol_{tot}^{req}}} \quad (2.28)$$

onde Vol_{tot}^{req} é o volume total esperado para o período que vai do tempo 1 ao T dado pela seguinte expressão:

$$Vol_{tot}^{req} = \sum_{j=1}^{NN} \sum_{i=1}^T Q_j^{req} t_i \quad (2.29)$$

As formulações apresentadas até aqui refletem a performance de uma RDA considerando o volume atendido pelo sistema como um todo ou por um nó qualquer. No entanto, o cômputo desses fatores não serve para refletir completamente a capacidade de atendimento do sistema. Para exemplificar a afirmação acima, considere as seguintes situações que podem ocorrer a uma rede (GOULTER, 1995):

1. Todos os nós da rede são atendidos em 100% do tempo com 90% da demandada prevista. Esta situação embora não seja ideal é aceitável pois quase toda a demanda está sendo atendida durante todo o tempo.
2. Todos os nós das redes têm 100% de suas demandas atendidas em 90% do tempo, sendo que nos 10% do tempo restante o atendimento é nulo. Este

cenário é mais desfavorável que o primeiro uma vez que durante um certo período nenhuma demanda é atendida, o que configura em uma falha grave do sistema;

3. Em 90% dos nós, 100% de suas demandas são atendidas durante todo o tempo, e os 10% dos nós restantes não há atendimento algum de demandas. Esta circunstância é a mais grave das três, visto que uma parte da rede não tem nenhum atendimento, apresentando uma falha permanente.

Em todas essas situações relatadas acima, o valor de CA para o sistema será igual a 90%. O CA de todos os nós nas situações 1 e 2 é 90%, enquanto que na 3 é de 1 para 90% dos nós e 0 para os 10% restantes. Fica claro que embora as três situações apresentem números iguais, eles não são suficientes para retratar a situação que ocorre na rede.

Embora esse seja um exemplo arbitrário, casos como esses podem ocorrer na rede e devem ser contemplados pela formulação. Assim, para que um índice avalie o atendimento de um sistema seja representativo, é necessário que ele leve em conta as diferentes situações capazes de ocorrer numa a rede.

Gupta e Bhave (1994) propuseram um ajuste para o fator de atendimento, que deve considerar conjuntamente as situações dos nós e no sistema. A formulação proposta é a seguinte:

$$fa = f_t f_l \sum_{j=1}^{NN} \sum_{i=1}^T \frac{Q_j^{Dem} t_i}{Vol_{tot}^{req}} \quad (2.30)$$

em que f_t é o fator tempo e f_l é o fator local.

O fator tempo é calculado pela seguinte expressão:

$$f_t = \sum_{j=1}^{NN} \sum_{i=1}^T \frac{a_j t_i}{T \cdot NN} \quad (2.31)$$

em que a_j será igual a 1 se vazão atendida em um nó para um período qualquer de tempo é maior ou igual que um limite aceitável e 0 se caso contrário.

O fator local será igual à média geométrica dos fatores de atendimento nos nós, ou seja:

$$f_l = \prod_{i=1}^{NN} CA_i \quad (2.32)$$

2.2.3 Cálculo da Confiabilidade Hidráulica em Redes de Distribuição de Água

Nos itens anteriores foram definidos os conceitos e formulações necessárias ao cálculo da confiabilidade hidráulica de um sistema de abastecimento de água. Essas medidas por si só, não são suficientes para a mensuração do parâmetro de confiança da rede, pois é preciso determinar as possibilidades de ocorrência dos possíveis cenários e da resposta do sistema aos mesmos.

Portanto, considerar e quantificar as diferentes situações que possam acontecer em uma RDA, bem como as suas probabilidades de ocorrência, são o objetivo da modelagem da confiabilidade hidráulica. Esta é uma das questões mais difíceis a ser tratada neste trabalho, visto que este estudo já dura quase duas décadas, e, no entanto, não existe até o momento um modelo geral que possa ser empregado em diferentes aplicações como projeto e reabilitação de RDAs.

Desde que se verificou a não aplicabilidade da minimização dos custos como critério único de projeto de RDAs na prática devido aos resultados serem redes ramificadas, vários pesquisadores procuraram incutir nos métodos dispositivos para superação desse problema obtendo-se então redes malhadas como resposta.

Os primeiros métodos foram tentativas que procuravam sistematizar a experiência dos projetistas dentro do processo de otimização. Um método baseado neste aspecto foi proposto por Rowell e Barnes (1982), em que o dimensionamento ótimo da rede é feito em duas etapas. Na primeira, determinam-se os diâmetros da rede considerando a mesma como ramificada. Na segunda, são adicionados, à rede ramificada encontrada, trechos interligando os nós, de modo a formar anéis. O diâmetro desses trechos devia ser suficiente para conseguir atender às demandas dos nós em caso de falha do trecho principal, encontrado na primeira etapa do método.

Outro trabalho que procurou incorporar algum aspecto de confiabilidade no dimensionamento de redes foi proposto por Goulter e Coals (1985) que desenvolveram um modelo integrando a confiabilidade a um algoritmo de PL para dimensionamento de RDAs. Para que pudesse ser usado como uma ferramenta de PL, esse modelo assume que todas as tubulações incidentes a um nó possuem diâmetros semelhantes, e, conseqüentemente, a mesma probabilidade de quebra. Considera também, que só ocorre falha em um nó quando este não está diretamente conectado à rede.

No final da década de 1980, vários trabalhos tentaram sistematizar a forma de se calcular a confiabilidade em RDAs. Por se tratar de um novo tema, diversas metodologias surgiram para tentar quantificar a confiabilidade numa rede (SU ET AL., 1987; WAGNER, SHAMIR e MARKS, 1988b; LANSEY ET AL., 1989; DUAN, MAYS E LANSEY, 1990; BOUCHART E GOULTER 1991; CULLINANE, MAYS E LANSEY, 1992). Na tentativa de classificar a grande quantidade de métodos desenvolvidos até então, Goulter (1995) propôs a divisão dos métodos de cálculo da confiabilidade empregados na análise de RDAs em três categorias, a saber:

- analíticos,
- simulação e;
- heurísticos.

Cada tipo de modelo tem suas vantagens e, principalmente, suas desvantagens, que em alguns casos tornam a sua aplicação mais restrita a determinados problemas. Nos modelos analíticos, a confiabilidade é calculada a partir da dedução dos parâmetros estatísticos que definem as variáveis do sistema como demandas e a capacidade da rede atender a esses requisitos. Os métodos de simulação avaliam a performance da rede sob diferentes cenários que podem ser escolhidos mediante experiência do projetista ou gerados a partir de uma distribuição que represente as condições esperadas para o comportamento do sistema. Por fim, têm-se os métodos heurísticos que buscam analisar a confiabilidade do sistema com base em medidas indiretas.

Os métodos de avaliação da confiabilidade de redes de abastecimento levam em consideração dois conceitos básicos. O primeiro se refere ao desempenho hidráulico, que é função de diferentes fatores tais como: demandas e pressões requeridas pela rede, diâmetros dos tubos, fluxo nas tubulações, perdas de carga ao longo dos trechos, grau de abertura das válvulas, etc. O segundo conceito concerne à configuração da rede, ou seja, o nível de conectividade entre os nós – em especial entre os pontos produtores e consumidores do sistema – e o layout da rede propriamente dito – que no caso, indica o número de anéis e a existência ou não de trechos ramificados. Embora ambos os conceitos sejam importantes para o bom desempenho da rede, a configuração da rede tem recebido maior atenção pelos métodos analíticos, enquanto que a performance hidráulica é dominante em métodos de simulação (GOULTER, 1995).

2.2.3.1 Modelos Analíticos

Os modelos analíticos são baseados em técnicas que tentam integrar analiticamente todos os parâmetros relacionados com as redes a as cargas a ela impostas, sem a necessidade de se realizar uma simulação hidráulica completa do sistema. Essa análise se baseia principalmente em conceitos da Teoria dos Grafos, para descrever a forma e a conectividade entre os trechos da rede.

Alguns modelos analíticos procuram considerar, no cálculo da confiabilidade não apenas a topologia da rede. A consideração da capacidade de transporte dos tubos pode ser feita mediante modelos simplificados do sistema que têm como base a Teoria dos Grafos em que os trechos são analisados separadamente, tendo como principal característica a capacidade de transporte (AHUJA, MAGNANTI e ORLIN, 1993). Embora seja um arranjo que possa ser utilizado com algum sucesso em sistemas ramificados, essas simplificações têm pouca representatividade para redes malhadas, uma vez que os valores e os sentidos das vazões transportadas nos trechos são desconhecidos *a priori*, e estes mudam em função da configuração da rede.

As categorias de métodos que se destacam dentre os modelos analíticos são: métodos de enumeração de estado, métodos de simplificação da rede e métodos de enumeração de caminhos. Embora os métodos analíticos não sejam muito utilizados, eles servem de base para a simulação. A descrição de alguns métodos analíticos é apresentada seguir.

2.2.3.1.1 Método da Enumeração de Estados

O método de enumeração dos estados exige que todos os possíveis estados do sistema sejam exaustivamente testados. Neste caso, entende-se por estado a configuração de elementos operacionais, ou não, do sistema. Para sistemas com n componentes existirão 2^n estados possíveis de ser avaliados. Os estados que apresentam sucessos são então identificados, e a probabilidade de ocorrência de cada evento operacional é então computada. A confiabilidade do sistema será a soma das probabilidades de sucesso. Este método embora seja o mais simples, é computacionalmente inviável para redes de maior porte, por exemplo, para redes de 50 trechos seria necessário avaliar um número superior a 10^{15} de situações o que demandaria centenas de anos para verificar todos os casos possíveis, mesmo com os computadores mais modernos (GOULTER ET AL., 1999).

2.2.3.1.2 Métodos de Simplificação da Rede

A simplificação da rede consiste em se fazer sucessivas reduções de um sistema com um grande número de trechos, substituindo trechos em série e em paralelo por trechos simples equivalentes, até que no fim haja apenas um trecho interligando a fonte produtora a um nó consumidor que se deseja estudar. Essas simplificações podem ser resumidas nas duas relações mostradas na Figura 2.3.

São dois os conceitos básicos são analisados nesse tipo de processo:

- *conectividade*: que denota a situação que todos os nós de uma rede estarem ligados a, pelo menos, uma fonte;
- *alcançabilidade*: que indica a capacidade de um nó específico da rede estar ligado a, pelo menos, uma fonte.

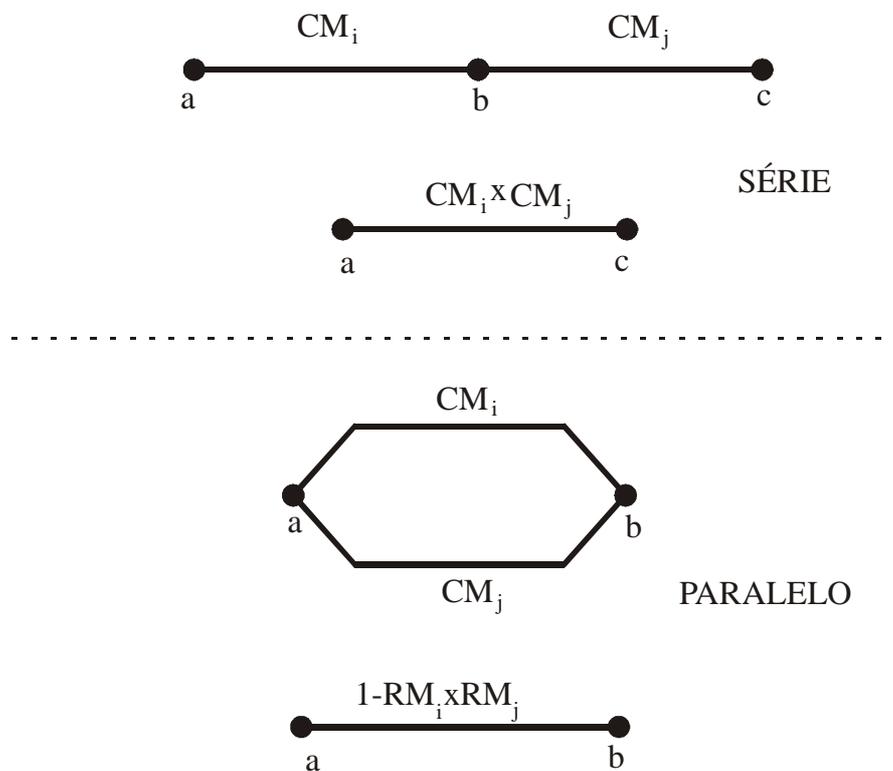


Figura 2.3 - Simplificações para tubos em série e paralelo (Adaptada de WAGNER, SHAMIR e MARKS, 1998a).

A conectividade é um parâmetro importante para indicar o grau de confiabilidade da rede como um todo, enquanto a alcançabilidade está relacionada à confiabilidade de um nó específico. A principal vantagem deste método é a possibilidade de uma verificação rápida da confiabilidade e adequação da rede, bem como, de uma análise do grau de confiança de cada nó (GOULTER, 1995).

Existem vários algoritmos que podem ser utilizados para simplificar a rede, todos provenientes da Teoria dos Grafos. Para sistemas simples pode ser aplicado o algoritmo de Satyanarayana e Wood (1982) que é muito eficiente para representar problemas de série-paralelo com apenas uma fonte produtora. Sistemas mais complexos, podem ser resolvidos pelo algoritmo de Rosenthal (1977), que embora mais difícil de implementar, é capaz de representar vários tipos de redes existentes (WAGNER, SHAMIR e MARKS, 1998a).

2.2.3.1.3 Métodos de Enumeração de Caminhos

Os métodos de enumeração de caminhos são ferramentas bastante utilizadas dentro da Teoria dos Grafos para se fazer a análise de uma rede. A principal vantagem desse tipo de método é a redução do número de alternativas a serem analisadas, principalmente quando comparado aos métodos de enumeração de estados.

Do conjunto de metodologias que compõe essa classe de métodos, os mais utilizados em sistemas de distribuição de água são: método do caminho mínimo (*minimum tie-set*) e método do mínimo corte (*minimum cut-set*) (TUNG, MAYS e CULLINANE, 1989).

Método do Caminho Mínimo

O caminho é definido como o percurso entre dois nós sem que um nó seja transposto mais de uma vez. No caso, caminho mínimo será aquele que apresentar a menor distância entre o nós. Uma árvore é definida como sendo uma rede que têm todos os seus nós conectados não apresentando nenhum ciclo, ou anel. No caso de sistemas de abastecimento o conceito de todos os nós estarem conectados pode-se considerar: “*todos os nós devem estar conectados a pelo menos uma fonte*”.

Seja T_i a i -ésima árvore de um sistema de abastecimento de água, assumindo que nesta condição o sistema irá operar satisfatoriamente, tem-se que a confiabilidade do sistema (CF) será (AGGARWAL, 1993):

$$CF = p \left[\bigcup_{i=1}^m T_i \right] \quad (2.33)$$

em que $P[j]$ é a probabilidade de que, ao menos, uma das m árvores possíveis do sistema esteja operacional.

Para exemplificar esse método considere a rede da Figura 2.5. Com base na definição de confiabilidade do sistema tem-se que (Figura 2.5):

$$T_1 = \{CM_1 \cup CM_2 \cup CM_4 \cup CM_5\} \quad (2.34)$$

Repetindo o processo para os outros caminhos mínimos, T_2 , T_3 , e T_4 , pode-se calcular a confiabilidade do sistema.

$$\begin{aligned} CF &= P[T_1 \cup T_2 \cup T_3 \cup T_4] \\ &= P[T_1] + P[T_2] + P[T_3] + P[T_4] \\ &\quad - \{P[T_1 \cap T_2] + P[T_1 \cap T_3] + P[T_1 \cap T_4] + \\ &\quad - \{P[T_2 \cap T_3] + P[T_2 \cap T_4] + P[T_3 \cap T_4]\} \\ &\quad + \{P[T_1 \cap T_2 \cap T_3] + P[T_1 \cap T_2 \cap T_4] + P[T_2 \cap T_3 \cap T_4]\} \\ &\quad - P[T_1 \cap T_2 \cap T_3 \cap T_4] \end{aligned} \quad (2.35)$$

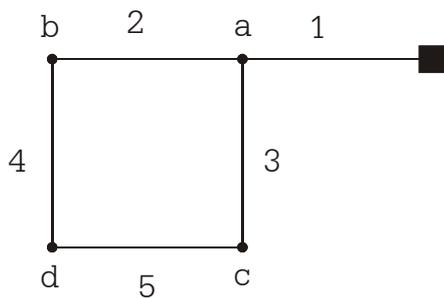


Figura 2.4 - Rede exemplo de cinco trechos

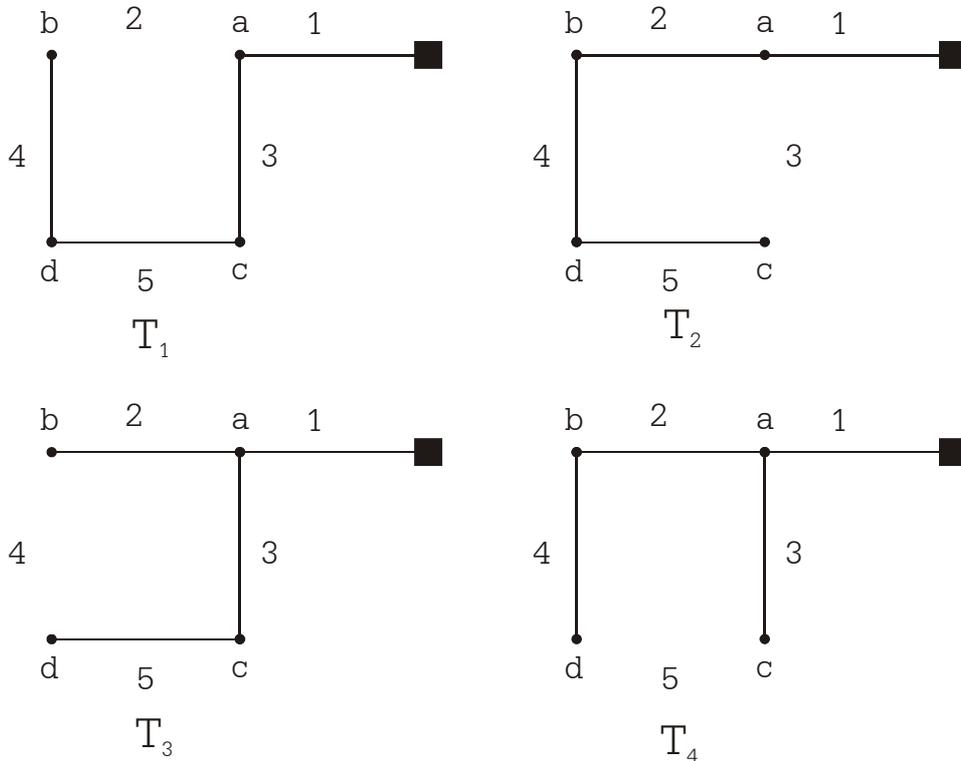


Figura 2.5 - Caminhos mínimos da rede de cinco trechos da Figura 2.4 (Adaptada de TUNG, MAYS e CULLINANE, 1989)

Método do Mínimo Corte

Entende-se por elementos essenciais o conjunto de componentes que, em caso de falha simultânea, acarrete uma falha grave ao sistema, ou seja, faça com que pelo menos um nó da rede esteja desconectado de pelo menos uma fonte. A desconexão mínima é aquela em que não é preciso que haja falha de mais nenhum componente para que o sistema entre em colapso. Seja C_i o n -ésimo conjunto mínimo desconectado, a confiabilidade de um sistema pode ser então expressa como (AGGARWAL, 1993):

$$CF = 1 - P\left[\bigcup_{i=1}^c C_i\right] \quad (2.36)$$

O conceito do método do mínimo corte aplicado à rede da Figura 2.4, considerando que os eventos são independentes, resulta no seguinte (Figura 2.6).

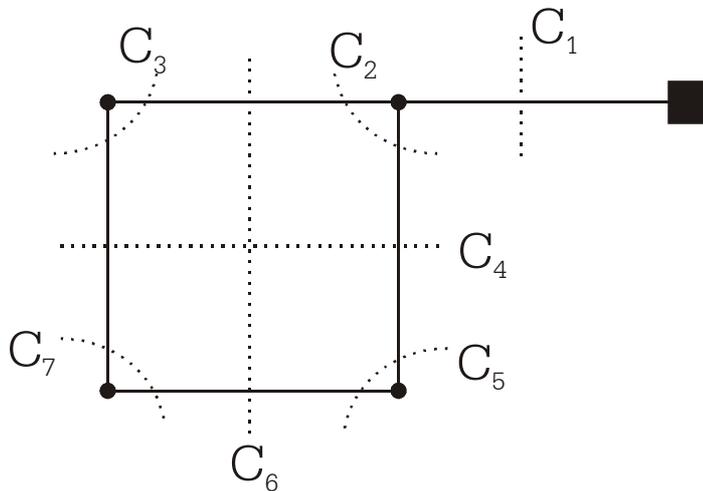


Figura 2.6 - Mínimos cortes da rede de cinco trechos da Figura 2.4 (Adaptada de TUNG, MAYS e CULLINANE, 1989)

Como:

$$\begin{aligned} P[C_1] &= RM_1 \\ P[C_2] &= RM_2 RM_3 \\ &\dots \\ P[C_7] &= RM_4 RM_5 \end{aligned} \quad (2.37)$$

então:

$$CF = 1 - [RM_1 + RM_2 RM_3 + RM_2 RM_4 + \dots + RM_4 RM_5] \quad (2.38)$$

Os métodos apresentados acima são apenas dois de uma série de metodologias que podem ser utilizadas para o cálculo da confiabilidade de RDAs. Entretanto, como no método da simplificação, essas metodologias servem apenas para

indicar o nível de conectibilidade da rede, não relevando os aspectos hidráulicos da rede.

Embora o número de cenários dos métodos dos caminhos mínimos e mínimo corte produzam resultados iguais, para sistemas de maior porte, o segundo método mostra-se computacionalmente superior, visto que a quantidade de situações avaliadas é menor. Por exemplo, para uma rede de dois anéis e oito trechos, o número de caminhos possíveis passa de 4 para 12, enquanto que o de cortes mínimos sobe de 7 para 9. Uma característica das redes, é que o dos caminhos mínimos aumenta potencialmente com o número de circuitos. Assim, o método dos mínimos caminhos é mais recomendado em sistemas ramificados ou com poucas malhas, enquanto que o do corte mínimo é mais usado em redes com muitas malhas.

Soi e Aggarwal (1981) avaliaram diversos métodos para o cálculo da confiabilidade em relação a várias redes de fluxo e verificaram que o método *cut-set* é o mais indicado para esse caso. Cullinane (1986) [citado por SU et al. 1987] verificou vários métodos em redes de distribuição de água chegando à conclusão de que o mínimo corte é o mais indicado para esses tipos de problemas.

Por considerar apenas aspectos referentes ao grau de conexão, não relevando a capacidade de transporte dos trechos, os métodos analíticos não são capazes, por si só, de avaliar a confiabilidade de atendimento das demandas de uma rede, pois a conexão entre um nó e a fonte é uma condição necessária, mas não suficiente para o bom funcionamento da rede.

2.2.3.2 Métodos de Simulação

Os métodos de simulação são definidos como aqueles que empregam um algoritmo externo para fazer a avaliação da RDA, verificando as demandas atendidas e/ou as pressões nos nós. Devido à complexidade das RDAs, não existe um modelo direto para o cálculo do balanço hidráulico dessas redes, sendo assim, todos os modelos disponíveis, até o momento, são baseados em processos iterativos. Por esse motivo, nesta classe de métodos, o comportamento de um sistema de distribuição de água (SDA) é representado por modelos hidráulicos que são capazes de levar em conta os mais diversos tipos de componentes como: válvulas redutoras de pressão, bombas, reservatórios, etc. Por serem iterativos, os modelos de simulação hidráulica implicam em maior tempo computacional e uma capacidade de processamento mais elevada (WAGNER, SHAMIR e MARKS, 1988b)

Quando empregado como ferramenta que auxilia o cálculo da confiabilidade, é recomendado que o modelo de simulação hidráulica, sempre que possível, incorpore em sua formulação uma medida de capacidade de atendimento (CA). No ítem 2.2.2.2, discutiu-se alguns modelos que podem ser utilizados para calcular o nível de falha durante eventos extremos que possam ocorrer a uma rede. Segundo esses modelos, cada nó pode apresentar três condições: normal, serviço restrito e falha completa. O sistema é dito normal se a pressão de serviço é maior que a requerida, nesta condição, toda a demanda é atendida. Ocorre uma falha completa no sistema, quando a carga em um nó é inferior à mínima aceitável, nesta condição, nenhuma demanda é atendida. O nó apresenta restrição de serviço quando a pressão é superior à mínima aceitável, mas inferior à requerida. Nesta condição as demandas são apenas parcialmente supridas (Eq 2.23).

Geralmente, nos métodos baseados em simulação, os processos de falha podem ser considerados independentes entre si, não obstante, supõe-se que ocorram até duas quebras de tubo simultâneas. Esta limitação tem um amparo prático, pois ao adotar-se três ou mais falhas simultâneas, a diferença no cálculo da confiabilidade será muito pequena, não compensando o tempo computacional adicional que se leva para se efetuar esse cálculo, que aumentará exponencialmente. A única exceção se dá quando a área dimensionada está sujeita a congelamentos e/ou terremotos, o que pode acarretar em falha conjunta de um número elevado de trechos (GOULTER, 1995).

Além da falha dos componentes, outro aspecto que pode ser avaliado para o cálculo da confiabilidade é a variação das demandas e das características físicas dos componentes, em especial a rugosidade dos tubos. Ao se acrescentar essas variáveis que influem na confiabilidade, o número de cenários possíveis tende a infinito. Como é inviável analisar todas as possíveis configurações da rede, os métodos de simulação procuram trabalhar com um conjunto finito de cenários gerados aleatoriamente, ou através da escolha do projetista. A partir desses cenários, calculam-se os intervalos de confiança para medidas de confiabilidade como: déficit anual, porcentagem de tempo em estado de restrição e porcentagem de tempo em estado de falha, para cada nó.

Praticamente todo o fundamento teórico para o cálculo da confiabilidade apresentado até aqui advém da Teoria da Confiabilidade. Com os modelos de simulação empregados em RDAs não é diferente. As duas principais metodologias empregadas no cálculo da confiabilidade de sistemas de distribuição de água são: a simulação Monte Carlo e o método do corte mínimo.

2.2.3.2.1 Simulação Monte Carlo

O método de simulação Monte-Carlo (SMC) é uma técnica clássica utilizada para tentar retratar o comportamento de sistemas quando a avaliação de todos os comportamentos possíveis é inviável, devido à dimensionalidade do problema.

A SMC para o cálculo da confiabilidade em RDAs tem sido empregada principalmente quando se quer retratar muitas variáveis aleatórias, mas que têm o seu comportamento expresso por uma distribuição de probabilidades, como: falha dos componentes, demandas nos nós e rugosidade dos tubos.

Wagner, Shamir e Marks (1998b) propuseram um dos primeiros métodos para o cálculo da confiabilidade de redes usando SMC. Foram simuladas situações de quebra de tubos e bombas, incluindo-se também os eventos de reparo dos componentes, porém, as demandas nos nós foram consideradas como constantes.

Bao e Mays (1990) utilizaram uma abordagem mais robusta em que simulações de diferentes vazões, e situações de quebra dos componentes eram feitas. No entanto, a aplicação do método proposto naquele trabalho se restringiu a um sistema adutor, composto por apenas uma tubulação.

Para se obter bons resultados da SMC, é necessário que se processe um grande número de cenários. Quando se considera apenas a análise de um tipo de fenômeno, como por exemplo apenas falhas dos componentes, considerando as demais variáveis fixas, o SMC se mostra menos eficiente do que outras metodologias de cálculo de confiabilidade (TOLSON ET AL., 2004).

Para diminuir esse entrave, Xu e Gouter (1998) e Gouter e Xu (1999) propuseram um método de cálculo da confiabilidade baseado em uma simplificação da SMC, em que apenas um componente apresenta falha por vez (*first order reliability method* - FORM). Além disso, a análise é feita em cima do chamado nó crítico, que é o mais afetado pela ocorrência de qualquer problema no sistema. Este método de cálculo da confiabilidade foi empregado por Tolson et al. (2004) com AGs no dimensionamento de duas redes exemplos, mostrando a eficiência da metodologia.

2.2.3.2.2 Método do Corte Mínimo

Embora ainda não haja uma metodologia padrão para o cálculo da confiabilidade, o método do corte mínimo, ou *minimum cut-set*, é o que apresenta maior aceitação no cálculo da confiabilidade de RDAs na atualidade (SHINSTINE, AHMED e LANSEY, 2002). A utilização do método *cut-set* em redes de distribuição de água é feita desde o final da década de 1980. A principal aplicação, e praticamente a única, desse método na otimização de RDAs foi feita por Su et al (1987). O método mostrou-se eficaz para os propósitos do cálculo da confiabilidade de uma rede com 14 trechos e apenas um anel. No entanto, a introdução de três novos trechos fez o tempo de processamento aumentar mais de dez vezes. Desde então, todos os trabalhos desenvolvidos utilizando o método do mínimo corte procuraram aperfeiçoar essa metodologia (FUJIWARA e DE SILVA, 1990; FUJIWARA E TUNG, 1991; TANYIMBOH, TABESH e BURROWS, 2001, entre outros).

Sabendo-se que a rede é dimensionada para funcionar mesmo em situações de falha dos componentes, mais especificamente as tubulações, é preciso analisar a capacidade de funcionamento, associando-as a probabilidades de ocorrência de cada situação.

Uma das formas de se calcular a confiabilidade do sistema funcionar é através da soma das probabilidades do sistema atender às demandas mesmo em situações de quebra. Assim, o conceito de confiabilidade adotado deve levar em consideração as probabilidades de funcionamento/quebra das tubulações, bem como a capacidade de atendimento das demandas nessas situações. A formulação para se calcular a confiabilidade de um nó (CF_j) de uma rede considerando a possibilidade de falha de até dois elementos simultaneamente será:

$$\begin{aligned}
 CF_j &= CM_{TOT} CA_j(\emptyset) + \sum_{i=1}^{NT} pf(\mathbf{S}_i) CA_j(\mathbf{S}_i) + \sum_{i=1}^{NT} \sum_{k \neq i}^{NT} pf(\mathbf{S}_{i,k}) CA_j(\mathbf{S}_{i,k}) \\
 &= CM_{TOT} \left[CA_j(\emptyset) + \sum_{i=1}^{NT} CA_j(\mathbf{S}_i) \frac{RM_i}{CM_i} + \sum_{i=1}^{NT} \sum_{k \neq i}^{NT} CA_j(\mathbf{S}_{i,k}) \frac{RM_i}{CM_i} \frac{RM_k}{CM_k} \right]
 \end{aligned} \tag{2.39}$$

sendo $pf(\mathbf{S}_i)$ a probabilidade que apenas um componente i não esteja disponível; $CA_j(\mathbf{S}_i)$ a capacidade de atendimento do nó j caso o componente i apresente falha; $pf(\mathbf{S}_{i,j})$ a probabilidade de que dois componentes i e j venham a falhar simultaneamente e $CA_j(\mathbf{S}_{i,j})$ a capacidade de atendimento da rede neste última situação. $CA_j(\emptyset)$ é a capacidade de atendimento da rede em perfeito estado operacional, ou seja com todas as tubulações funcionando.

Estendendo essa formulação para incorporar a possibilidade de cálculo de três ou mais componentes obtêm-se:

$$CF_j = CM_{TOT} \left[CA_j(\emptyset) + \sum_{i=1}^{NS} CA_j(\mathbf{s}_i) \prod_{l \in \mathbf{s}_i} \frac{RM_l}{CM_l} \right] \quad (2.40)$$

a confiabilidade total do sistema será fornecida por:

$$CF = CM_{TOT} \left[\overline{CA}(\emptyset) + \sum_{i=1}^{NS} \overline{CA}(\mathbf{s}_i) \prod_{l \in \mathbf{s}_i} \frac{RM_l}{CM_l} \right] \quad (2.41)$$

Como é presumível que a maioria dos componentes do sistema funcione perfeitamente em condições normais, é interessante realizar uma análise do comportamento da rede em condições anormais, ou seja, quando ocorreu alguma falha no sistema. Tanyimboh, Tabesh e Burrows (2001) propuseram uma medida, chamada de *tolerância (TL)* do sistema frente à falha de algum componente, expressa por:

$$TL = \frac{CF - \overline{CA}(\emptyset)CM_{TOT}}{1 - \overline{CA}(\emptyset)CM_{TOT}} \quad (2.42)$$

Assim, a tolerância à falha é uma medida que indica a probabilidade do sistema funcionar quando da ocorrência de falha de algum componente ou durante um evento de manutenção. Para sistemas com níveis de confiabilidade alta, como é o caso das redes de distribuição de água, a utilização da *tolerância* é mais útil do que a medida de confiabilidade em si.

A vantagem da metodologia do corte mínimo para mensurar a confiabilidade está no aspecto de que não é preciso calcular todas as situações possíveis. Se, quando da quebra de uma tubulação, ocorre uma falha no sistema, não é necessário avaliar as combinações resultantes de tubos com aquele em que ocorreu a falha, visto que este é um ponto de corte mínimo.

2.2.3.3 Métodos Heurísticos

Os métodos de simulação mostraram-se precisos para o cálculo da confiabilidade. No entanto, o preço pago por essa precisão é um acréscimo assustador da quantidade de processamento complementar necessário para esse fim. Por esse motivo, foram propostas maneiras de se estimar a confiabilidade das RDAs utilizando conceitos heurísticos. A adoção desse tipo de método é, sem dúvida, importante quando se trabalha com problemas de otimização que requerem avaliação da

confiabilidade de um número muito grande de alternativas. Uma evidência desse fato é a falta quase completa de trabalhos que façam a otimização de redes utilizando métodos tradicionais de confiabilidade.

Devido à necessidade de indicadores eficazes, para um bom dimensionamento de um RDA, a medida de confiabilidade utilizada em algoritmos de otimização deve ao mesmo tempo:

- ser capaz de lidar com os diferentes tipos de falha do sistema, hidráulica e mecânica;
- e apresentar um procedimento de cálculo simples.

Os métodos heurísticos de medida da confiabilidade procuram, em sua maioria, aumentar a redundância da rede. Genericamente, a redundância de um sistema pode ser definida como sendo a existência de caminhos alternativos para o abastecimento de um determinado nó ou zona da rede (GOULTER, 1995). Como foi apresentado anteriormente (item 2.2), pode-se aumentar a redundância de uma rede de duas formas: por meio do aumento do grau de conectividade da rede; e/ou através do super-dimensionamento dos diâmetros dos tubos.

Nos últimos anos duas medidas foram postas como forma de se medir indiretamente a redundância das redes: entropia e resiliência. A primeira está relacionada ao aumento da distribuição das vazões ao longo dos trechos, enquanto que a segunda procura mensurar o nível de folga das pressões nos nós da rede. Detalhes destas duas funções serão mostrados a seguir

2.2.3.3.1 Entropia

O conceito de entropia foi relacionado primeiramente à teoria clássica da termodinâmica. Entretanto, essa medida pode ser aplicada em uma variada gama de campos da ciência dentre os quais estuda da configuração de sistemas (KAPUR E KESAVAN, 1991).

A exigência básica de uma RDA malhada é a de que as demandas de um nó qualquer não sejam abastecidas apenas por um caminho preferencial, mas sim por um conjunto de caminhos que estejam ligados diretamente a este nó. Tais caminhos irão transportar proporções diferentes de água de modo a atender às demandas nodais. No entanto, para efeito do aumento da confiabilidade é desejável que essa distribuição seja o mais equânime possível, pois em caso de uma distribuição muito desigual do

fluxo, a falha em um trecho que transporte maior vazão provocaria um impacto maior no abastecimento de água da rede.

O princípio hidráulico implícito no desejo de se ter o fluxo o mais distribuído possível é explicado a seguir. Em uma rede de distribuição instalada, a perda de carga em um trecho (j) será proporcional ao quadrado da vazão transportada (q^2). Considerar, por exemplo, um nó abastecido por dois trechos. Se a vazão em um trecho for substancialmente maior do que noutro trecho adjacente, ocorrerá um aumento potencial da perda de carga no trecho de menor vazão, já que ao se dobrar a vazão, haverá um aumento de quatro vezes na perda de carga. Por outro lado, o aumento do diâmetro de um trecho (d), irá reduzir significativamente a perda de carga, já que esta é inversamente proporcional à sua quinta potência (d^5). Sendo assim, a determinação de uma configuração de diâmetros ideal deve considerar a uniformidade de distribuição do fluxo da rede.

Shannon (1948) propôs os axiomas que regem o cálculo da redundância de um sistema baseado na entropia, e que são apresentados a seguir (AWUMAH, GOULTER e BHATT, 1991):

Considere uma rede com N nós e seja a entropia, que expressa a redundância em um nó j , expressa por S_j .

1. S_j será função das frações das vazões $q_{1j}, q_{2j}, q_{3j}, \dots, q_{n(j)j}$, sendo:

$$\sum_{i=1}^{n(j)} q_{ij} = 1 \quad (2.43)$$

onde $n(j)$ é o número de trechos incidentes ao nó j ;

2. S_j será igual a zero se $n(j)$ for igual a 1;
3. para um dado número fixo de trechos j , a redundância será máxima quando todos os fluxos de todos os trechos incidentes forem iguais.
4. o valor de S_j será incrementado com o aumento de $n(j)$, isso implica que para fluxos iguais a redundância poderá ser aumentada incrementando-se o número de nós incidentes.

Existem várias funções que servem para expressar a entropia S , no entanto, a equação utilizada em problemas de redes de abastecimento de água é a proposta por Shannon (1948), que é dada por:

$$\frac{S}{K} = -\sum_{i=1}^I \wp_i \ln(\wp_i) \quad (2.44)$$

em que K é uma constante positiva arbitrada, geralmente tomada como 1; \wp_i é um parâmetro do sistema; e I é o número de subsistemas.

Esta função de entropia será base para todas as outras formulações utilizadas em sistemas de abastecimento de água. Pode-se verificar, ainda, que esta equação é capaz de atender todos os axiomas propostos.

Inicialmente é necessário definir o parâmetro \wp para os sistemas de distribuição de água. Seja uma rede composta por N nós, que no caso serão os subsistemas. Em uma condição qualquer de fluxo (demanda), considere que i seja o n -ésimo arco incidente ao nó j , e que esteja transportando uma vazão q_{ij} , então:

$$\wp_{ij} = \frac{q_{ij}}{\sum q_j} \quad (2.45)$$

onde $\sum q_j$ é a soma das $n(j)$ vazões incidentes ao nó j .

O parâmetro \wp_{ij} representa a contribuição do fluxo proveniente do trecho i , ao fluxo total que passa pelo nó j e serve como medida de capacidade relativa que será incorporada na função de entropia. Esta medida é um indicador da contribuição potencial que um link possui de atender um excesso de demanda que pode ocorrer devido à falha de um outro trecho. Com isso, a equação de entropia pode ser escrita como:

$$S_j = -\sum_{i=1}^{n(j)} \left(\frac{q_{ij}}{Q_j} \right) \ln \left(\frac{q_{ij}}{Q_j} \right) \quad (2.46)$$

Maximizar a função (2.46) significa maximizar a redundância do nó j , pois o maior valor de S_j ocorrerá quando os valores de q_{ij} forem iguais, que é a condição desejável para a distribuição dos fluxos na rede. Essa expressão fornece a medida da entropia de apenas um nó. O desenvolvimento da equação da entropia para toda a rede, segue um procedimento semelhante.

Poder-se-ia supor que a entropia total do sistema fosse igual à soma das entropias dos nós. No entanto, esse conceito, não leva em conta a contribuição do fluxo transportado por um determinado trecho dentro do contexto geral da rede, pois quando há uma falha em um determinado tubo, os trechos sobrecarregados não serão apenas os adjacentes ao nó daquela tubulação. Assim, a importância do trecho com

relação ao fluxo total, e não a importância relativa ao nó incidente, será relevante para a determinação da entropia da rede como um todo.

Seja Q_o a soma de todos os fluxos incidentes aos nós da rede para uma determinada condição de demanda. É importante notar que o valor de Q_o será maior ou igual à demanda total da rede (Q_{tot}^{Dem}), uma vez que uma certa porção de água poderá ser transportada por mais de um trecho da rede. Assim o parâmetro utilizado para o cômputo da entropia da rede será q_{ij}/Q_o , resultando na seguinte equação: (AWUMAH, GOULTER e BHATT, 1991):

$$\hat{S} = \sum_{j=1}^N \left[- \sum_{i=1}^{n(j)} \left(\frac{q_{ij}}{Q_o} \right) \ln \left(\frac{q_{ij}}{Q_o} \right) \right] \quad (2.47)$$

A equação 2.46 também pode ser escrita como sendo:

$$\hat{S} = \sum_{j=1}^N \left(\frac{Q_j}{Q_o} \right) S_j - \sum_{j=1}^N \left(\frac{Q_j}{Q_o} \right) \ln \left(\frac{Q_j}{Q_o} \right) \quad (2.48)$$

Outras formulações foram propostas para representar a entropia do sistema como a proposta por Tanyimboh e Templeman (1993) e a de Walters (1995). Segundo Tanyimboh e Templeman (1993) a entropia total do sistema será:

$$\hat{S} = - \sum_{j \in IN} \left(\frac{D_j}{Q_{tot}} \right) \ln \left(\frac{D_j}{Q_{tot}} \right) - \frac{1}{Q_{tot}} \sum_{j=1}^N Q_j \left[\left(\frac{D_j}{Q_j} \right) \ln \left(\frac{D_j}{Q_j} \right) + \sum_{i \in N(j)} \left(\frac{q_{ij}}{Q_j} \right) \ln \left(\frac{q_{ij}}{Q_j} \right) \right] \quad (2.49)$$

onde D_j representa o fluxo externo, que é injetado (nós fonte) ou retirado (nós consumidores), em j ; Q_{tot} é a demanda total do sistema; J representa todos os nós do sistema, fontes e consumidores; IN é o conjunto de nós fonte; $N(j)$ representa os nós imediatamente a jusante de j .

Walters (1995) propõe uma equação mais simples do que a proposta por Tanyimboh e Templeman (1993) onde a entropia da rede será:

$$\hat{S} = - \sum_{ij \in NT} \left(\frac{q_{ij}}{D_o} \right) \ln \left(\frac{q_{ij}}{D_o} \right) + \sum_{j=1}^N \left(\frac{D_j}{D_o} \right) \ln \left(\frac{D_j}{D_o} \right) \quad (2.50)$$

sendo NT o número de trechos da rede.

Os modelos heurísticos, incluindo aqueles que utilizam a entropia para calcular a redundância, requerem que se relacione a medida heurística com a confiabilidade. O que resulta, no final, na necessidade do cálculo da confiabilidade por um método convencional. Como as medidas de entropia do sistema irão variar de uma

rede para outra, é necessário para cada caso relacionar essas medidas com valores de confiabilidade (TANYIMBOH e TEMPLEMAN, 2000).

2.2.3.3.2 *Resiliência*

O conceito de resiliência, aplicado às redes de distribuição, foi proposto por Todini (2000) e tem sido utilizado em diversos trabalhos como medida de confiabilidade do sistema (CHEUNG, 2004; PRASAD e PARK, 2004). Quando uma rede é projetada para atender estritamente uma determinada condição de demanda e pressão, dimensiona-se a tubulação de tal modo que não ocorra, praticamente, nenhuma “folga” de pressão nos nós. Com isso, quando qualquer falha sobrevier sobre o sistema, as demandas não serão atendidas completamente (TODINI, 2000).

Considerando esse fato, é desejável que a rede seja dimensionada com uma folga de pressão que será utilizada quando da ocorrência de problemas no sistema, tornando-o capaz de atender as demandas com as pressões mínimas exigidas mesmo nessa situação. Essa capacidade adicional de suportar falhas na rede através do incremento de carga hidráulica no nó é denominada *resiliência*.

Para uma rede abastecida por NR reservatórios, a potência hidráulica total (POT_{tot}) do sistema é definida como sendo:

$$POT_{tot} = \gamma \sum_{k=1}^{NR} Q_k h_k \quad (2.51)$$

em que γ é o peso específico da água, NR é o número de reservatórios da rede, Q_k é a vazão fornecida pelo reservatório k que possui carga hidráulica de h_k .

A potencia total é o resultado da soma de dois componentes: potência interna (POT_{int}) e potência externa (POT_{ext}). O primeiro componente se refere à potência perdida nas tubulações enquanto que o segundo é a potência fornecida aos usuários expressa como:

$$POT_{ext} = \gamma \sum_{i=1}^{NN} Q_i h_i \quad (2.52)$$

A resiliência do sistema pode ser então medida pelo *índice de resiliência* que é igual a:

$$I = 1 - \frac{POT_{int}}{POT_{req}} \quad (2.53)$$

sendo:

$$POT_{int} = POT_{tot} - \gamma \sum_{i=1}^{NN} Q_i h_i \quad (2.54)$$

e

$$POT_{req} = POT_{tot} - \gamma \sum_{i=1}^{NN} Q_i h_i^{req} \quad (2.55)$$

substituindo em (2.52) obtêm-se:

$$I = 1 - \frac{\gamma \sum_{k=1}^{NR} Q_k h_k - \gamma \sum_{i=1}^{NN} Q_i h_i}{\gamma \sum_{k=1}^{NR} Q_k h_k - \gamma \sum_{i=1}^{NN} Q_i h_i^{req}} \quad (2.56)$$

assim:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^{NN} Q_i (h_i - h_i^{req})}{\sum_{k=1}^{NR} Q_k h_k - \sum_{i=1}^{NN} Q_i h_i^{req}} \quad (2.57)$$

A resiliência é uma medida que têm diversas vantagens, a saber: é fácil de se calcular com os dados obtidos através de um modelo hidráulico; seu valor é sempre relativo à pressão requerida; e apresenta uma escala equivalente de comparação entre redes, o que não ocorre nas medidas de entropia.

A principal desvantagem da resiliência é que ela não afere o grau de distribuição das vazões, o que pode acarretar em uma rede ramificada com um valor de resiliência alto.

Prasad e Park (2004) efetuaram uma modificação na formulação da resiliência de modo a considerar a distribuição dos fluxos na rede. O procedimento adotado nesse trabalho é descrito a seguir:

Sejam $d_1, d_2, d_3 \dots d_{ntj}$, os diâmetros das tubulações ligadas a um nó j . Considerando que $d_1 \geq d_2 \geq d_3 \dots \geq d_{ntj}$, define-se a uniformidade no nó como:

$$U_j = \frac{\sum_{k=1}^{npj} d_k}{ntj \max\{d_j\}} \quad (2.58)$$

O novo índice proposto, denominado resiliência *da rede* (network resilience), será:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^{NN} U_i Q_i (h_i - h_i^{\text{Req}})}{\sum_{k=1}^{NR} Q_k h_k - \sum_{i=1}^{NN} Q_i h_i^{\text{Req}}} \quad (2.59)$$

2.2.4 Considerações Sobre os Métodos de Otimização do Custo com Restrições de Confiabilidade

O estudo da confiabilidade ainda será fruto de muitos trabalhos da pesquisa operacional aplicados a sistema de distribuição de água. O avanço ocorrido nos últimos anos consolidou o método do tipo mínimo 'cut-set', adaptado a redes de distribuição de água, como o mais adequado para o cálculo da confiabilidade daqueles sistema, pois o nível de abstração do problema é pequeno, sendo, dentro do possível, eficiente ao não pesquisar situações que produzam resultados já calculados (SHINSTINE, AHMED e LANSEY, 2002, TANYIMBOH, TABESH e BURROWS, 2001).

No entanto, a aplicação prática desses métodos a otimização sistemas reais é ainda difícil dado o elevado tempo computacional requerido. Su et al. (1987) aplicaram um método semelhante e verificaram que a adição de apenas 2 trechos (passando de 14 para 16) aumentou o tempo necessário à resolução do problema em mais de 10 vezes, passando de 14 min para 250 min. Esse aumento ocorreu em virtude dos trechos adicionados que elevaram o número de circuitos básicos de 1 para 3.

Embora faça mais de 15 anos, e os computadores sejam cerca de mil vezes mais rápidos, ainda não existe capacidade computacional suficiente em máquinas comuns para resolver estes problemas de otimização.

Uma alternativa que vêm sendo aventada é a utilização de medidas indiretas, como a entropia e a resiliência, para aferir a confiabilidade. Considerando os fatores que influenciam na redundância, a entropia é uma medida que indica o grau de conexão entre os nós, enquanto que a resiliência mensura o nível de superdimensionamento dos componentes da rede.

De um modo geral, pode-se dizer que os modelos mais completos (no caso os de simulação) retornam melhores valores de confiabilidade da rede, porém o tempo computacional necessário para essa análise é muito alto. Por outro lado, as medidas heurísticas são mais diretas, no entanto, o grau de sua precisão pode deixar a desejar visto que, individualmente, são insuficientes para exprimir todos os aspectos da confiabilidade das RDAs.

2.3 *Otimização Multiobjetivo*

Nos tópicos anteriores deste capítulo foram apresentados métodos de dimensionamento de redes de distribuição de água usando técnicas de otimização. Estes métodos produzem como resposta apenas uma rede, que deve ser aceita ou não pelo decisor, não lhe permitindo considerar, por exemplo, a variação da confiabilidade com o custo. Esse tipo de abordagem impede que o engenheiro exerça sua capacidade de decisão, uma vez que, o cerne do problema do dimensionamento de redes é escolher, com base na relação entre custo e confiabilidade, qual é a melhor solução (HOBBS e BIEM, 1988).

No ítem 1.2 do Capítulo 1, foram colocadas algumas das dificuldades de se empregar otimização multiobjetivo simples para o dimensionamento de RDAs, a saber: resultados não reais e/ou incoerentes, funções objetivo pouco representativas, dificuldade de se estabelecer restrições, resultados restritivos e dificuldade de assimilação dos modelos pelos projetistas. Walsky (2002) aponta como uma das saídas para esse impasse, a utilização de métodos multiobjetivos.

Embora a ênfase deste diagnóstico seja recente, as bases para a utilização da Análise de Sistemas em problemas de SDAs foram postas por Neufville, Schaake e Stafford (1971). Neste trabalho é destacada a necessidade de se empregar metodologias que considerem diferentes objetivos para auxiliar na decisão de projetos envolvendo SDAs. Os autores propuseram que o dimensionamento de redes de distribuição de água seja feito em cinco etapas:

1. definição dos objetivos que farão parte da análise;
2. formulação matemática dos objetivos;
3. geração de um conjunto de soluções para o problema;
4. avaliação das alternativas com base nas formulações desenvolvidas para descrever os objetivos;
5. seleção da alternativa preferida, considerando a importância dada a cada objetivo.

Essa metodologia foi aplicada a um problema de planejamento do abastecimento da cidade de Nova Iorque, que na época custava um bilhão de dólares (cerca de seis bilhões em valores atuais). Os objetivos considerados foram um índice

de desempenho do sistema, obtido com base na pressão média nos nós, e o custo total de implantação e operação do sistema.

Embora seja da mesma época dos trabalhos clássicos de Jacoby (1968) e Karmelli, Gadish e Meyers (1968), a abordagem multiobjetivo proposta por Neufville, Schaake e Stafford (1971), não foi bem absorvida, visto que não existiam ferramentas adequadas para uma aplicação eficiente dos princípios levantados naquele trabalho.

Na última década alguns trabalhos utilizaram o conceito de ótimo Pareto para geração de um conjunto de soluções que fornecesse uma relação entre o custo e alguma medida de confiabilidade (AWUMAH, GOULTER e BHATT, 1991; TODINI, 2000). Entretanto o foco das metodologias propostas era verificar a viabilidade da técnica de cálculo da confiabilidade e não fazer uma otimização multiobjetivo.

Até o fim dos anos 1990, poucos trabalhos procuraram empregar o conceito de otimização multiobjetivo aos SDAs. Um dos poucos foi o proposto por Cenedese e Gallerano (1987) em que dois objetivos, pesos da tubulação (para representar o custo) e potência do sistema, foram empregados para gerar um conjunto Pareto. O método utilizado para a geração foi o das restrições- ϵ (ver capítulo 3), com uma técnica de otimização não-linear, entretanto, nenhuma técnica de seleção de alternativas foi empregada.

O uso de métodos multiobjetivo na otimização de SDAs ficou muito restrito até o fim dos anos 1990. Nesse período surgiu uma adaptação das técnicas de algoritmos evolucionários que impulsionou o campo da otimização multiobjetivo em SDAs. Diferente do que ocorre em metodologias de otimização convencionais, esses novos métodos denominados MOEA (Multi Objective Evolutionary Algorithms) permitiram efetuar uma análise multiobjetivo sem que a quantidade de cálculo adicional aumentasse exponencialmente (mais detalhes desses métodos podem ser vistos no capítulo seguinte). Essa nova abertura proporcionou o desenvolvimento de vários trabalhos em todos os ramos da Análise de Sistemas em RDAs como: operação (CARRIJO, 2004) reabilitação (HALHAL ET AL, 1997, CHEUNG, 2004) calibração (KAPELAN, SAVIC e WALTERS, 2003).

Prasad e Park (2004) empregaram o método NSGA (SRINIVAS E DEB, 1994) para gerar uma curva de *trade-off* a ser empregada no dimensionamento de duas redes exemplos. Os objetivos considerados foram o custo do projeto e a resiliência do sistema.

Os trabalhos de dimensionamento relatados até o momento empregam dois objetivos no dimensionamento das redes: custo e confiabilidade. Um fator importante no dimensionamento, e que contrasta com a confiabilidade, é o de perdas de água por vazamento nas redes. Embora na fase de projeto não seja possível determinar o nível de vazamento na rede, é sabido que esse vazamento ocorrerá. Principalmente se for levado em conta que as redes novas são instaladas em locais onde as ligações prediais, que são as principais causas de vazamentos nas redes, serão feitas em uma fase posterior sem apropriada fiscalização durante execução. Dessa forma, deve-se considerar, na fase de projeto, medidas que procurem minimizar as perdas por vazamentos.

2.4 Perdas por Vazamento

Nos serviços de abastecimento as perdas de água correspondem aos *volumes não contabilizados*. Essas perdas podem ser consideradas como físicas, referentes à parcela que não chega aos usuários, ou não físicas, relacionadas ao que é consumido, porém, não contabilizado.

As perdas não físicas, ou de faturamento, resultam de: ligações clandestinas ou não cadastradas, defeitos nos equipamentos de medição domiciliar (hidrômetros), adulterações nos hidrômetros, e falta de medição com a cobrança feita pelo consumo médio. A redução desse tipo de perdas tem por finalidade aumentar a arrecadação, melhorando a eficiência financeira da companhia de abastecimento.

As perdas físicas originam-se de vazamentos ao longo do sistema de abastecimento de água (captação, estação de tratamento, adução, reservação, e distribuição), bem como de procedimentos operacionais como: lavagem de filtros, descarga da rede ou da adutora. A redução das perdas físicas permite diminuir os custos de operação e manutenção do sistema, mediante o abatimento do consumo de energia e produtos químicos, utilizando as instalações existentes para aumentar a oferta sem, no entanto, necessitar de uma ampliação desnecessária do sistema.

Segundo Silva e Conejo, 1998, o desenvolvimento de medidas sistemáticas de controle de perdas no sistema envolve a necessidade de implantação de algumas ações antes mesmo do início de operação, dentre as quais:

- boa concepção do SDA, considerando os dispositivos de controle operacional do processo;

- qualidade adequada das instalações das tubulações, equipamentos e demais dispositivos;
- implantação de mecanismos de controle operacional;
- elaboração de cadastros;
- execução de testes pré-operacionais de ajustes do sistema.

Sendo as perdas não físicas impossíveis de se minimizar na fase de projeto, o interesse desse trabalho se voltará para as perdas físicas que ocorrem nos SDAs.

2.4.1 Perdas Físicas

As perdas físicas totais são aquelas que ocorrem ao longo de todo o SDA que se estende da captação até os ramais prediais. Elas são constituídas pelos vazamentos, visíveis ou não, das tubulações ao longo do sistema, pelas descargas e esvaziamentos das redes e adutoras, pelos extravasamentos dos reservatórios e pelo volume excedente utilizado na lavagem de filtros e outros dispositivos das estações de tratamento de água. A Tabela 2.1 mostra as perdas físicas por subsistema considerando a origem e magnitude.

As perdas físicas podem ser classificadas em operacionais e vazamentos. As perdas operacionais podem aparecer de diferentes formas no sistema produtivo (lavagem de filtros) e nos procedimentos operacionais (descargas para melhoria da qualidade da água, e limpeza de reservatórios), ou podem apresentar-se na forma de falhas evidentes de operação (extravasamento de reservatórios). Esse tipo de perda, embora significativo do ponto de vista volumétrico, pode ser minorado através de medidas simples, que requerem pouco investimento adicional como: a melhoria no controle operacional; treinamento de pessoal; e instalação de alarmes. Por exemplo, muitos rompimentos que ocorrem na adução e distribuição de água tratada são decorrentes de falhas operacionais dos próprios funcionários, que na maioria das vezes são mal treinados para a realização desta prática, fazendo-os mediante procedimentos empíricos. (CONEJO, LOPES e MARCKA, 1999a).

As perdas por vazamentos são decorrentes da ruptura nas adutoras, redes de distribuição e ramais prediais, falhas em conexões e peças especiais, trincas nas estruturas e falha de impermeabilização de reservatórios. A redução desse tipo de perdas está ligada a cuidados de manutenção, estado das estruturas e tubulações, critérios adotados na fase de planejamento e projeto, e, também, regras operacionais.

Na fase de projeto a redução das perdas físicas por vazamentos na rede é visada através da redução das cargas hidráulicas nas tubulações (JOWITT e XU, 1990).

Tabela 2.1 Perdas Físicas por subsistemas (adaptada de CONEJO, LOPES e MARCKA 1999a)

Subsistema	Origem	Magnitude
Adução de Água Bruta	- Vazamento nas tubulações - Limpeza do poço de sucção*	Variável, função do estado das tubulações e da eficiência operacional
Tratamento	- Vazamentos estruturais - Lavagem de filtros - Descarga de lodo*	Significativa, função do estado das instalações e da eficiência operacional
Reservação	- Vazamentos estruturais - Extravasamentos - Limpeza*	Variável, função do estado das instalações e da eficiência operacional
Adução de Água Tratada	- Vazamento nas tubulações - Limpeza do poço de sucção* - Descargas	Variável, função do estado das tubulações e da eficiência operacional
Distribuição	- Vazamento na rede - Vazamento nos ramais - Descargas	Significativa, função do estado das tubulações e principalmente das pressões na rede

2.4.2 Perdas por Vazamentos nas Redes de Distribuição

As perdas físicas por vazamento que ocorrem na distribuição são elevadas, na maioria dos casos, constituindo na principal origem desse tipo de fuga nos SDAs. Porém, por estarem enterradas e espalhadas por grandes extensões da área urbana, as RDAs apresentam as maiores dificuldades para controle de perdas dentro de um sistema de abastecimento de água.

A magnitude dessas perdas será tanto maior quanto pior for o estado das tubulações, principalmente quando se trabalha sistemas que possuem com pressões elevadas. A experiência tem mostrado que a maioria dos vazamentos concentram-se nos ramais prediais, sendo, a sua detecção difícil e onerosa. Assim, na maioria dos casos, o investimento necessário para sanar esses vazamentos individualmente, é muito superior à economia conseguida (CORTES-ARREGUIN e OCHOA-ALEJO, 1997).

Na sua fase de concepção, o SDA é dividido em setores, com limites de atendimento bem definidos, sendo, preferencialmente, abastecidos por um só ponto com uma unidade de reservação própria para regular as variações de consumo. Os setores de

abastecimento devem ser subdivididos em zonas de pressão, em função da topografia, e das pressões estáticas e dinâmicas, que obedecem a limites prefixados por norma (CORTES-ARREGUIN e OCHOA-ALEJO, 1997).

Por mais que se esforce para se realizar um bom planejamento, este nem sempre, pode ser levado a cabo. No Brasil, a maioria das ampliações de sistemas urbanos de distribuição de água ocorrem na direção das ocupações urbanas da periferia, sem que haja nem um planejamento de infra-estrutura do local. Nas décadas de 1970 e 1980, o crescimento acelerado e desordenado das cidades forçou as empresas de saneamento a atenderem o maior número de pessoas possível, empregando para isso obras improvisadas, não previstas no planejamento (CONEJO, LOPES e MARCKA, 1998b).

De um modo geral, as perdas por vazamentos nas redes de distribuição de água e ramais prediais se devem a: materiais e idade das tubulações, assentamento das tubulações, excesso de pressões na rede, alimentação da rede por bombeamento direto, transientes hidráulicos, ausência de válvulas e ventosas, entre outros.

Dos diversos fatores que afetam as perdas por vazamentos na rede, o mais significativo na etapa de projeto da rede de distribuição é o controle das pressões nas tubulações (VAIRAVAMOORTHY e LUMBERS, 1998). Levando-se em conta esse fato, o foco desse trabalho estará voltado à redução dos excessos de pressão na rede, uma vez que os outros fatores podem ser controlados através de melhores critérios de construção, manutenção e operação do sistema de distribuição, como também da adoção de equipamentos apropriados para combater os transientes hidráulicos na rede.

2.4.3 Controle das Perdas por Vazamentos em Redes de Distribuição

O objetivo de qualquer procedimento de redução de vazamentos em uma rede é minimizar o excesso de pressão, assegurando, entretanto, um valor mínimo de carga hidráulica a ser mantido durante todo o tempo para atender as demandas impostas pelos usuários.

Um dos primeiros trabalhos sobre a otimização de perdas em redes foi o de Sterling e Bargiela (1984), que procurava minimizar a pressão na rede como forma de diminuir os vazamentos, utilizando um modelo de simulação hidráulica, para escoamento permanente, baseado no método de Newton-Raphson. Uma formulação

semelhante foi empregada por Francato (2000), na otimização da operação de reservatórios, considerando múltiplos objetivos.

Germanopoulos e Jowitt (1989) propuseram um método em que as perdas eram incorporadas explicitamente nas equações do problema. Neste trabalho, a função objetivo empregada foi a mesma de Sterling e Bargiela (1984), com o vazamento considerado através de restrições. O modelo hidráulico utilizado foi o Método da Teoria Linear de Isaacs e Mills (1980), em que um procedimento de linearização da equação de perdas foi adotado para poder acoplar os vazamentos ao modelo hidráulico proposto.

Jowitt e Xu (1990) utilizaram o mesmo procedimento empregado por Germanopoulos e Jowitt (1989) modificando a função objetivo, que passou a ser a minimização dos vazamentos, e o tipo de linearização empregado.

Em ambos os trabalhos, o método de otimização utilizado na minimização foi a Programação Linear Sucessiva. Outros trabalhos têm empregado técnicas de otimização variadas. Reis, Porto e Chaudhry (1997), utilizaram Algoritmos Genéticos e linearizações sucessivas para minimizar vazamentos através da alocação e ajuste de válvulas dentro da rede. Vairavamoorthy e Lumbers (1998) empregaram a Programação Quadrática Sequencial (SQP) no mesmo problema, considerando como variáveis de decisão o grau de abertura das válvulas.

Martínez, Conejos e Vercher (1999) propuseram um método que considera diretamente as perdas nos nós da rede, o que não ocorre no método de Germanopoulos e Jowitt (1989), que têm as perdas distribuídas ao longo dos trechos. Este modelo foi utilizado por Alonso, Alvarruiz e Guerrero (2000) num processo de PQS com Processamento Paralelo para minimizar os vazamentos da rede.

Tucciarelli, Criminisi e Termini (1999) propuseram um método que considera as tubulações, dentro de zonas predeterminadas, como tendo comportamento relativamente homogêneo de vazamentos, de modo que os parâmetros de vazamento são função da superfície dos tubos.

2.4.4 Modelos de Vazamentos

Os modelos de vazamentos empregados para avaliações de redes, podem ser de dois tipos: globais, que consideram a pressão média por zona como variável de determinação das perdas (WRC, 1980; LAMBERT e HIRNER, 1999); e detalhados onde a avaliação de perdas é feita para cada nó (GERMANOPOULOS e JOWITT, 1989;

MARTÍNEZ, CONEJOS e VERCHER, 1999; TUCCIARELLI, CRIMINISI e TERMINI, 1999). Por serem muito genéricos, e indicados para a etapa de planejamento da rede, os modelos globais não foram considerados neste trabalho.

Considerando que o vazamento é consequência direta de defeitos na rede, pode-se caracterizá-lo baseado na equação de descarga em orifícios:

$$Vaz = K(p_1 - p_2)^\theta \quad (2.60)$$

em que Vaz é o vazamento; K é um coeficiente que depende da forma e da área do orifício; P_1 é a pressão a montante do orifício; P_2 é a pressão a jusante do orifício; e θ é o expoente tido como 0,5 de acordo com a teoria ou outros valores obtidos em campo.

Pode-se dizer que a pressão externa ao orifício é a atmosférica, ou seja P_2 é 0. O coeficiente K pode ser determinado a partir de observações de campo ou através da experiência. Embora o valor teórico do expoente da fórmula seja 0,5, dados experimentais têm mostrado que no vazamento em redes de distribuição de água esse coeficiente é bem maior, por volta de 1,18 (WRC, 1980, JOWITT e XU, 1990), como indica a Figura 2.7.

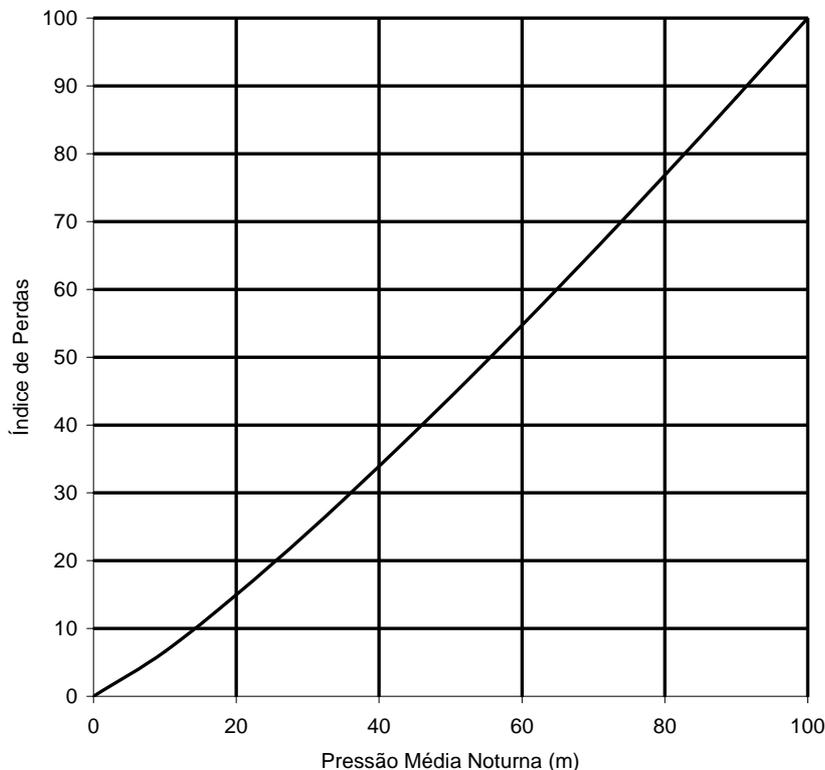


Figura 2.7 - Relação entre a Vazamento e Pressão (JOWITT e XU, 1990)

Segundo Jowitt e Xu (1990) o vazamento ao longo de um trecho de tubulação será:

$$Vaz_{ij} = CL_{ij}L_{ij}(p_{ij})^{1,18} \quad (2.61)$$

em que CL_{ij} é o coeficiente de vazamento por unidade de comprimento para pressão de serviço e depende das características da tubulação (idade, características do solo, diâmetro do tubo, etc); L_{ij} é o comprimento do tubo entre os nós i e j ; e P_{ij} é a pressão média no trecho fornecida por:

$$P_{ij} = \frac{1}{2}[(h_i - z_i) + (h_j - z_j)] \quad (2.62)$$

sendo z_j a cota do nó j .

Martínez, Conejos e Vercher (1999) propuseram uma formulação semelhante a Jowitt e Xu (1990):

$$Vaz_j = K_j(p_j)^{1,18} \quad (2.63)$$

em que K_j é um coeficiente de vazamentos associado ao nó j .

Na formulação de Tucciarelli, Criminisi e Termini (1999) foram considerados constantes os coeficientes de vazamentos por unidade de superfície dos tubos pertencentes a determinadas áreas da rede. Ou seja, o coeficiente vazamentos por unidade de superfície da tubulação na rede terá o mesmo valor para uma mesma região. Essa consideração é importante no processo de calibração de redes, onde se procura trabalhar com o menor número de parâmetros possível. Os autores consideraram que o vazamento seria:

$$Vaz_j = (h_j - z_j)^{\theta_j} \sum_{i=1}^{M_j} \varphi_{ji} \frac{\pi}{2} d_{ji} L_{ji} \quad (2.64)$$

sendo φ_{ij} é o coeficiente de perdas por unidade de superfície do tubo entre os nós i e j ; e d_{ij} é o diâmetro da tubulação.

A principal vantagem de se utilizar uma formulação que tem o vazamento calculado nos nós, e não nos trechos, é computacional, uma vez que, o método utilizado tem o seu equacionamento desenvolvido para nós. Além disso, a utilização da Eq. (2.62) melhora a propriedade de dominância diagonal da matriz Jacobiana, o que aumenta diretamente a capacidade de convergência do sistema.

2.4.5 Considerações sobre os Métodos de Otimização Multiobjetivo

Embora o custo e a confiabilidade ainda sejam os principais objetivos visados no dimensionamento de uma RDA, a consideração de vazamentos na etapa de projeto da rede pode melhorar a eficiência de medidas tomadas para a redução das perdas, principalmente em sistemas com topografia acidentada.

Os trabalhos que empregam técnicas multiobjetivo desenvolvidos até o momento para projetos de RDAs têm seu foco na fase de geração de soluções Pareto, não dando ênfase a uma fase importante do processo que é a escolha de uma alternativa a ser adotada como solução, embora essa tenha sido apenas uma das cinco etapas propostas por Neufville, Schaake e Stafford (1971). As outras etapas, principalmente a escolha da configuração final da rede foi pouco abordada na literatura.

Os métodos multiobjetivo, embora tenham sido propostos, no início dos anos 1970, só vieram tornar viáveis no dimensionamento de RDAs com o surgimento de técnicas mais eficientes para determinar as possíveis soluções do projeto. Tais métodos, baseados em técnicas evolucionárias, têm se mostrado uma importante ferramenta na solução de problemas envolvendo mais de um objetivo. Detalhes sobre a formulação de problemas multiobjetivo e as técnicas utilizadas para resolvê-los são apresentados no próximo capítulo.

3. MÉTODOS MULTIOBJETIVOS

3.1 *Introdução*

As sociedades modernas são caracterizadas pela rápida expansão das demandas por recursos como: água, alimentos, insumos, minerais, etc. Essas demandas ocorrem num cenário onde a disponibilidade desses recursos não cresce e, em alguns casos, diminui. Quando os recursos disponíveis tornam-se insuficientes para atender a todas as demandas, surgem os *conflitos* de interesses. Esse tipo de cenário vem se tornando frequente em relação aos recursos hídricos, cujos aproveitamentos apresentam usos concorrentes para a água como: abastecimento humano, geração de energia, controle de cheias, irrigação, navegação, etc.

A forma inicial de se tratar esse tipo de problema foi a aplicação de análises do tipo custo-benefício. Essa abordagem, predominante nos anos 1960, foi adotada através da aplicação de técnicas de otimização simples (de apenas 1 objetivo) para determinar a solução que apresentaria a melhor relação custo-benefício.

A adoção de um critério estritamente econômico, que é muito bem aceita para a análise de projetos privados, por vezes, não é a mais adequada quando se lida com o chamado *interesse público*, uma vez que esses critérios por si só, não norteiam, o atendimento dos interesses da sociedade. Aspectos ambientais e sociais também devem ser considerados em projetos financiados pelos cofres públicos, sendo que, tais aspectos são de quantificação financeira difícil ou simplesmente impossível. De modo a contrapor-se aos aspectos puramente econômicos na análise de projetos públicos, passou-se a empregar metodologias multiobjetivo para escolha da solução que melhor atendessem aos interesses dos investidores, neste caso, a população como um todo.

Embora não se tenha explicitamente conflito de interesses entre diferentes usuários que irão utilizar concorrentemente um recurso, como no caso da água de reservatórios de acumulação, os projetos de sistemas de distribuição de água, no meio urbano, são obras públicas, cujos objetivos, como o menor custo e a maior confiabilidade, revelam-se conflitantes.

Na ocasião de escolha dos métodos a serem utilizados na resolução dos problemas multiobjetivo, segundo o princípio de Pareto, dois conceitos básicos devem ser levados em conta: *busca das melhores soluções* e *escolha da solução (tomada de decisão)*. O primeiro conceito se refere à determinação da região Pareto ótima,

enquanto que o segundo conceito busca apontar uma solução, dentre as soluções Pareto identificadas, que melhor reflete a opinião do decisor (ZITZLER DEB e THIELE., 2000).

As abordagens, que explicitamente consideram mais de um objetivo em sua formulação, podem ser implementadas de várias formas. O modo de se escolher a melhor solução e as peculiaridades do problema serão fatores fundamentais na determinação da metodologia adotada.

A forma de classificação dos métodos multiobjetivos mais aceita atualmente e proposta por Cohon (1974):

1. técnicas de geração de soluções Pareto;
2. técnicas de articulação *a priori* de preferências ou métodos não-iterativos;
3. técnicas de articulação progressiva de preferências ou métodos iterativos.

Os métodos de *geração de soluções Pareto*, também chamados de *métodos à posteriori* ou ainda de *otimização vetorial*, procuram gerar o conjunto de soluções não dominadas empregando técnicas de otimização. O domínio em que essas soluções são encontradas geralmente é contínuo, com um número infinito de alternativas factíveis. O conjunto Pareto é então levado a um tomador de decisão para que se possa escolher, dentre as soluções pertencentes àquele conjunto, aquela que apresenta um maior nível de compatibilidade ou preferência. Um aspecto importante desses métodos é a forma em que as alternativas encontradas são apresentadas ao decisor. Para problemas com dois objetivos são gerados gráficos em duas dimensões (2D) que são de fácil visualização e interpretação. No entanto, para três ou mais objetivos, a visualização das relações de compensação é mais complexa.

Outro problema relacionado a esses métodos diz respeito ao elevado número de soluções a serem avaliadas, principalmente, se o número de objetivos for muito grande, dificultando as avaliações computacionais.

O fluxo do trabalho desse método é: **analista → decisor → solução ótima**

Nos métodos de articulação prévia de preferência o tomador de decisão especifica sua preferência antes da solução do processo. A dificuldade desse método é que em muitos casos o decisor não conhece suficientemente o comportamento das soluções não dominadas, o que, em problemas práticos, dificulta a quantificação, de antemão, da relação (trade-off) entre os objetivos, fazendo com que a má escolha de

valores prévios conduza aos resultados pouco compatíveis com a real opinião do decisor (VELDHUIZEN E LAMONT, 1998). Outros dos métodos englobados nessa classe, como a *Programação de Compromisso (Goal Programming)*, podem ter como resultado uma solução não pertencente ao conjunto Pareto (GOICOECHEA, HANSEN e DUCKSTEIN, 1982).

A utilização de métodos de articulação prévia de preferência é mais adequada nos casos em que as alternativas já estão elencadas, sendo denominados neste caso métodos *multiatributos*. Tais métodos lidam, geralmente com domínios discretos, e requerem uma comparação ou interrelação entre os objetivos. Tais metodologias têm se mostrado adequadas para auxiliar na escolha da alternativa que apresenta um maior nível de compatibilidade, uma vez que, mesmo se conhecendo as possíveis soluções, a escolha da mais adequada ainda é um processo difícil quando se considera mais de dois objetivos.

De um modo geral, a capacidade computacional necessária para processar os métodos *a priori* é muito inferior à empregada pelos métodos de geração de frentes Pareto.

O fluxo do trabalho deste método é: **decisor → analista → solução ótima**

Para a terceira classe de métodos, denominados também de *iterativos*, a escolha da melhor solução é feita de modo mais interativo entre o analista e o decisor, uma vez que as preferências do tomador de decisão podem variar ao longo do processo de otimização.

Embora essa metodologia tente superar as principais deficiências das duas classes anteriores, os métodos interativos necessitam que o decisor tenha *tempo* e *capacidade* suficientes para cooperar com o analista. A disponibilidade de tempo por parte dos decisores é reduzida, uma vez que as suas funções, geralmente administrativas, não lhes permitem estar sempre à disposição para analisar dados e ponderar suas preferências. Além disso, em muitos casos, os tomadores de decisão não têm a capacidade técnica suficiente para intervir de modo satisfatório no processo (MIETTINEN, 1999).

O fluxo do trabalho do métodos *iterativos* é:

analista ↔ decisor → solução ótima.

Uma vez que não se conhece a priori o conjunto de soluções Pareto, e visto que o número de possíveis alternativas para projetos de sistemas de distribuição de água é muito grande, considera-se que o problema em questão é indeterminado e contínuo, devendo ser solucionado inicialmente por um método de geração de soluções não dominadas.

Ao se lidar com um número maior que dois objetivos, torna-se difícil para o tomador de decisão analisar de forma clara qual é realmente a sua preferência. Como consequência, emprega-se uma metodologia multiatributo para selecionar, com base nas preferências do tomador de decisão, a solução de maior compatibilidade.

Uma visão geral dos principais métodos de *geração de frentes Pareto e multicriteriais* será feita ao longo desse capítulo.

3.2 Métodos de Geração de Frentes Não Dominadas

3.2.1 Definições

Antes de apresentar técnicas de geração de frentes Pareto, será feita uma pequena revisão dos conceitos necessários ao bom entendimento desses métodos. Apesar de alguns desses conceitos já terem sido mencionados neste capítulo, convém fazer uma apresentação formal dos mesmos.

3.2.1.1 Problema da Otimização Multiobjetivo

Embora alguns autores não considerem a análise multiobjetivo como uma metodologia de *otimização* (GOICOECHEA, HANSEN e DUCKSTEIN, 1982), esse termo será empregado ao longo deste trabalho. Em primeiro lugar, as técnicas de geração de frentes não dominadas têm seu embasamento na mesma teoria utilizada em problemas de otimização simples, proposta por Kunh e Tucker (1951). Em segundo lugar, na definição de *Análise de Sistemas*, usada por Rogers e Fiering (1986), é necessário que esteja envolvido uma técnica de busca (otimização), para que um método seja englobado pela referida conceituação, o que é o caso da análise multiobjetivo.

O problema de geração de frentes Pareto pode ser formulado da seguinte maneira. Sendo o vetor \mathbf{x} de variáveis de decisão, o problema pode ser expresso como:

$$\begin{aligned}
\text{Minimizar}^1 \mathbf{Z}(\mathbf{x}) &= [Z_1(\mathbf{x}), Z_2(\mathbf{x}), Z_3(\mathbf{x}), \dots, Z_M(\mathbf{x})] && (3.1) \\
\text{sujeito a}^2: & \quad g_j(\mathbf{x}) \geq 0 && \forall \quad j=1,2, \dots, J \\
& \quad h_k(\mathbf{x}) = 0 && \forall \quad k=1,2, \dots, K \\
& \quad x_i^{(U)} \geq x_i \geq x_i^{(L)} && \forall \quad i=1,2, \dots, P
\end{aligned}$$

em que $\mathbf{Z}(\mathbf{x})$ é o vetor das funções multiobjetivo $Z_m(\mathbf{x})$; M é o número de objetivos do problema; $g_j(\mathbf{x})$ são funções de restrição de desigualdade; J é o número de funções de desigualdade; $h_k(\mathbf{x})$ são funções de restrição de igualdade; K é o número de funções de igualdade; $x_i^{(U)}$ e $x_i^{(L)}$ são os limites superiores e inferiores sobre as variáveis de decisão; N é o número de variáveis de decisão.

A região delimitada pelos valores limite que as variáveis de decisão podem assumir é denominada de *espaço das variáveis de decisão*. O local dentro do espaço das variáveis de decisão limitado de maneira a satisfazer o conjunto de restrições de igualdade e desigualdade do problema é denominado de *região factível* (\mathbf{X}_f).

A diferença principal da otimização multiobjetivo para a de objetivo único, é que a primeira trabalha em um espaço multidimensional no campo dos objetivos, denominado *espaço dos objetivos*. Assim para cada solução \mathbf{x} pertencente ao espaço das variáveis de decisão, existe um ponto associado no espaço dos objetivos (Figura 3.1).

3.2.1.2 Dominância

Em problemas de otimização simples, todos os componentes da região factível podem ser completamente ordenados segundo a função objetivo Z da seguinte forma: sejam $\mathbf{x}^{(1)}$ e $\mathbf{x}^{(2)}$ duas soluções pertencentes a \mathbf{X}_f , então uma das seguintes expressões é verdadeira: $Z(\mathbf{x}^{(1)})$ é melhor que $Z(\mathbf{x}^{(2)})$ ($Z(\mathbf{x}^{(1)}) > Z(\mathbf{x}^{(2)})$); $Z(\mathbf{x}^{(1)})$ é pior que $Z(\mathbf{x}^{(2)})$ ($Z(\mathbf{x}^{(1)}) < Z(\mathbf{x}^{(2)})$) ou $Z(\mathbf{x}^{(1)})$ é igual a $Z(\mathbf{x}^{(2)})$ ($Z(\mathbf{x}^{(1)}) = Z(\mathbf{x}^{(2)})$). No entanto, quando se lida com mais de um objetivo, a região factível não pode ser completamente ordenada (ZITZLER 1999).

A maior parte das técnicas multiobjetivo utiliza o conceito de *dominância*. Segundo esse conceito, duas soluções são comparadas e verifica se uma domina a

¹ Para facilitar a compreensão, neste trabalho, adotou-se como formulação padrão de minimização de todas as funções objetivo. A maximização de uma função pode ser feita multiplicando-se a mesma por -1 .

² Esta é a forma expandida das restrições ao problema, nas equações posteriores será empregada a forma condensada ($\mathbf{x} \in \mathbf{X}_j$)

outra ou não. O conceito de dominância ou dominalidade foi proposto por Edgeworth (1881), sendo posteriormente aperfeiçoado por Pareto (1896) (MIETNEN, 1999).

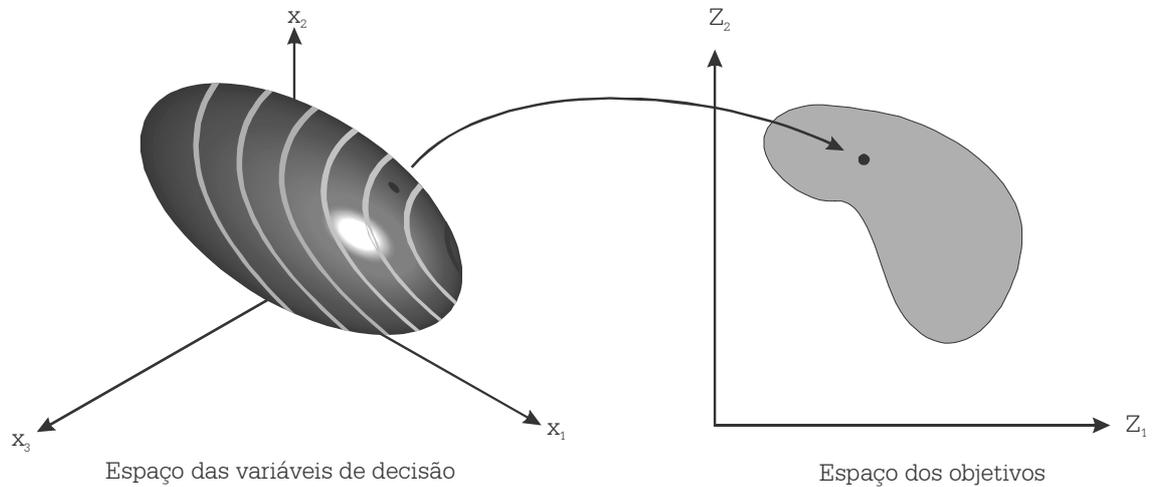


Figura 3.1 Representação dos espaços das variáveis de decisão e dos objetivos

A dominância de uma alternativa sobre outra pode ser expressa da seguinte forma (DEB, 2001). Uma solução $Z(\mathbf{x}_1)$ domina uma solução $Z(\mathbf{x}_2)$, se ambas as afirmações forem verdadeiras:

1. a solução $Z(\mathbf{x}_1)$ não é superior à solução $Z(\mathbf{x}_2)$ em nenhum dos M objetivos e;
2. a solução $Z(\mathbf{x}_1)$ é inferior do que a solução $Z(\mathbf{x}_2)$ para pelo menos um objetivo.

A partir desse conceito pode-se dizer que existem três possibilidades de dominância entre duas soluções \mathbf{x}_1 e \mathbf{x}_2 :

$$\begin{array}{ll}
 Z(\mathbf{x}_1) \succ Z(\mathbf{x}_2) & Z(\mathbf{x}_1) \text{ domina } Z(\mathbf{x}_2) \\
 Z(\mathbf{x}_1) \prec Z(\mathbf{x}_2) & Z(\mathbf{x}_1) \text{ é dominada por } Z(\mathbf{x}_2) \\
 Z(\mathbf{x}_1) \sim Z(\mathbf{x}_2) & Z(\mathbf{x}_1) \text{ e } Z(\mathbf{x}_2) \text{ são indiferentes.}
 \end{array}$$

Seja P um conjunto de soluções, o *conjunto de soluções não-dominadas* P' , é composto por todas as soluções que não são dominadas por nenhum elemento de P . Quando a série P , é representada por toda a região factível, o conjunto não-dominado resultante P' , é chamado de *conjunto Pareto ótimo* (DEB, 2001).

Muitos métodos multiobjetivo utilizam-se de soluções especiais para tentar definir os limites da fronteira Pareto. Essas soluções, o *vetor objetivo ideal* e o *vetor objetivo nadir*, são descritas a seguir.

3.2.1.3 Vetor Objetivo Ideal

O vetor objetivo ideal é definido como sendo o vetor obtido da minimização individual de todos os objetivos. Matematicamente o vetor objetivo ideal (\mathbf{Z}^*) é definido como:

$$Z_i^*(\mathbf{x}) = \min Z_i^*(\mathbf{x})$$

sujeito a: $\mathbf{x} \in \mathbf{X}_f$

Se o vetor ideal pertencesse à região factível, a frente não dominada do problema seria ele próprio. No entanto, para problemas com objetivos concorrentes isso não ocorre, sendo o vetor ideal apenas um ponto de referência dentro do espaço de objetivos correspondentes às possíveis soluções (Figura 3.2).

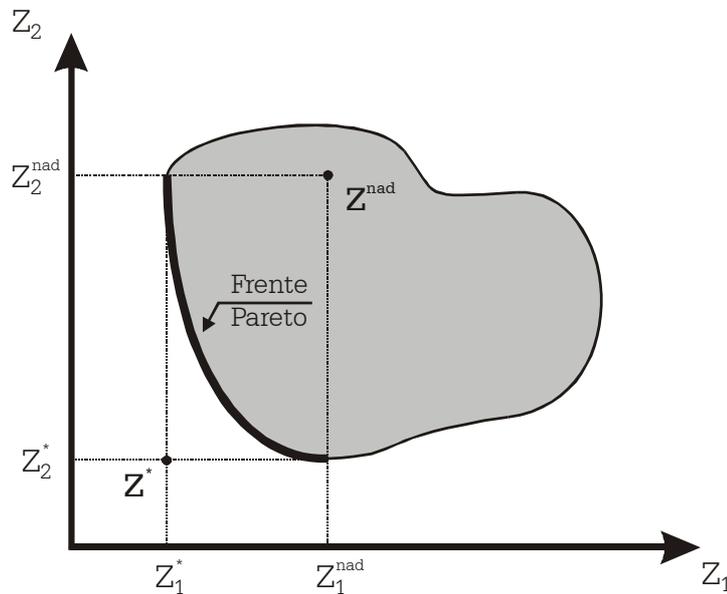


Figura 3.2 Vetores objetivo ideal e nadir no espaço objetivo de duas dimensões

3.2.1.4 Vetor Objetivo Nadir

O vetor objetivo nadir ($\mathbf{Z}^{\text{nadir}}$) representa quase o oposto do vetor ideal, que são os melhores valores de funções objetivo possíveis de serem encontrados. Por definição, o vetor nadir é composto pelos piores valores dos objetivos considerando apenas o conjunto Pareto ótimo (Figura 3.2). O nadir pode ser também definido como sendo o *melhor* vetor que é estritamente dominado pelo frente não dominada.

Na prática, a determinação do vetor objetivo nadir é bem mais complexa que a do vetor ideal, uma vez que para sua determinação é preciso se ter um bom conhecimento prévio da fronteira Pareto.

Uma alternativa empregada na determinação do vetor nadir é considerar que os piores valores das funções objetivos. Com essa abordagem Miettinen (1999) definiu o vetor nadir como sendo aquele formado pelos maiores valores das funções objetivo encontrados no processo de determinação do vetor ideal.

A principal aplicação desses dois vetores está associada à normalização das funções objetivo, uma vez que as mesmas são, muitas vezes expressas em unidades com valores muito díspares. Miettinen (1999), empregou a seguinte equação para normalizar o valor de uma função objetivo:

$$Z_i^{norm} = \frac{Z_i - Z_i^*}{Z_i^{nad} - Z_i^*} \quad (3.2)$$

Os métodos de definição da frente Pareto podem ser classificados como: *multiobjetivos clássicos* e *multiobjetivos evolucionários*. Os primeiros utilizam na sua estrutura técnicas que buscam otimizar apenas uma função objetivo por vez, empregando, para determinar a frente das soluções não dominadas, um conjunto de vetores, de peso ou restrições. Vale salientar que o emprego de técnica de otimização evolucionária para determinação da frente Pareto, não implica que a mesma é *multiobjetivo evolucionária*. Para ela ser classificada dessa forma é preciso que, na estrutura do método, exista uma mudança no modo de se trabalhar com mais de um objetivo simultaneamente. Na maioria dos métodos isso é feito empregando-se diretamente na estrutura do algoritmo de otimização o conceito de *dominância*. Nos itens seguintes serão comentadas algumas técnicas clássicas de geração de frentes Pareto, bem como alguns dos principais métodos evolucionários desenvolvidos nos últimos anos.

3.2.2 Métodos Clássicos

Embora existam numerosos métodos multiobjetivos clássicos para a geração da região Pareto ótima, a maioria desses são ramificações de duas metodologias principais: *método dos pesos* e *método das restrições- ϵ* . Existe, ainda, uma outra linha de métodos que são os baseados no algoritmo Simplex da Programação Linear, como os propostos por Philip (1972) e Zeleny (1971). Entretanto, estas metodologias não podem ser aplicadas a problemas de natureza não-linear, como é o caso desse trabalho.

3.2.2.1 Método dos Pesos

O método dos pesos foi apresentado por Gass e Saaty (1955), sendo posteriormente aperfeiçoado por Zadeh (1963), que lhe deu a forma pela qual é conhecido atualmente. O método dos pesos agrega, através da multiplicação de ponderadores, os diversos objetivos em uma única função, e, devido a sua simplicidade, é um dos mais utilizados (GOICOECHEA, HANSEN e DUCKSTEIN, 1982).

Originalmente, o método dos pesos foi empregado como uma metodologia multiobjetivo a priori, em que o decisor antecipadamente definia os pesos de cada critério utilizado. Entretanto, o emprego efetivo dessa metodologia fica prejudicado dificultando a determinação dos pesos, pela falta de conhecimento antecipado das relações entre os objetivos. Como pequenas alterações nos pesos geram resultados diferentes, essa metodologia passou a ser utilizada como um meio de geração da região Pareto ótima.

O método dos pesos considera a otimização de uma combinação linear dos objetivos expressa da seguinte forma:

$$\text{Minimize} \quad \mathbf{Z}(\mathbf{x}) = w_1 Z_1(\mathbf{x}) + w_2 Z_2(\mathbf{x}) + w_3 Z_3(\mathbf{x}) + \dots + w_M Z_M(\mathbf{x}) \quad (3.3)$$

$$\text{sujeito a:} \quad \mathbf{x} \in \mathbf{X}_f$$

sendo w_i os pesos positivos e normalizados de modo que $\sum w_i = 1$.

No caso de, um problema com dois objetivos, que tem dois valores para os pesos fixados w_1 e w_2 e dado que $\mathbf{Z}(\mathbf{x})$ é a combinação linear dos desses pesos, a Equação (3.3) representa uma reta no espaço dos objetivos que possui inclinação $-\frac{w_1}{w_2}$ (Figura 3.3). O ponto em que a reta tangencia a fronteira Pareto, corresponde a solução ótima para aquela configuração de pesos. A região Pareto completa seria então determinada a partir da resolução do problema de minimização para uma série de combinações dos pesos (Figura 3.3).

Por sua simplicidade, o método dos pesos é de fácil implementação. Entretanto, essa metodologia apresenta um número muito grande de desvantagens, a saber (COHON, 1974; GOICOECHEA, HANSEN e DUCKSTEIN, 1982 e DEB 2001):

- pode-se encontrar uma mesma solução para diferentes conjuntos de pesos utilizados;

- para problemas não-lineares, um conjunto de pesos uniformemente distribuído, não retorna um conjunto Pareto ótimo também distribuído de forma igual;

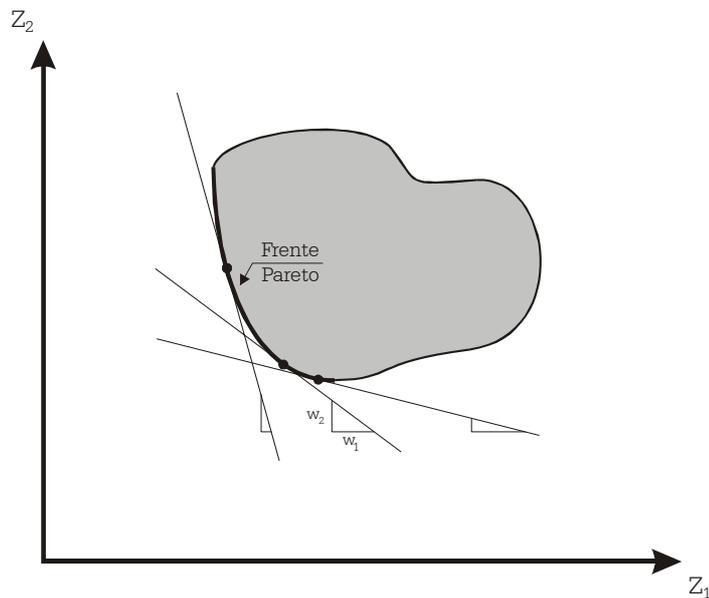


Figura 3.3 Método dos pesos para um problema de dois objetivos

- para problemas multiobjetivos que apresentarem mais de uma solução ótima para um determinado conjunto de pesos (o que é frequente quando se trabalha com funções multimodais), deve-se utilizar um algoritmo de otimização global – que requer um tempo computacional elevado para encontrar uma solução – caso seja empregado um método de busca que produza como respostas soluções locais, algumas faixas de soluções do conjunto não dominado podem não ser encontradas

- a complexidade computacional do método dos pesos aumenta exponencialmente com o número de objetivos do problema, sendo o número de otimizações necessárias para se determinar a frente Pareto determinado pela equação:

$$ns = M^{K-1} \tag{3.4}$$

em que ns é o número de problemas a ser otimizado, K é a quantidade de pontos da frente não dominada que se quer determinar;

- o método dos pesos também é incapaz de trabalhar com problemas envolvendo regiões não convexas, visto que não se consegue determinar os pontos pertencentes a tais regiões (Figura 3.4).

Para se superar a última dificuldade, desenvolveram-se metodologias em que o problema é resolvido utilizando distâncias métricas. Dois desses métodos são:

método dos pesos com métricas (BOWMAN 1976 apud MIETTINEN, 1999) e o método de Benson (BENSON, 1978). Essas metodologias embora superem o problema de se lidar com regiões não convexas, ainda apresentam todas as outras dificuldades citadas, acarretando uma complexidade computacional ainda maior (MIETTINEN, 1999).

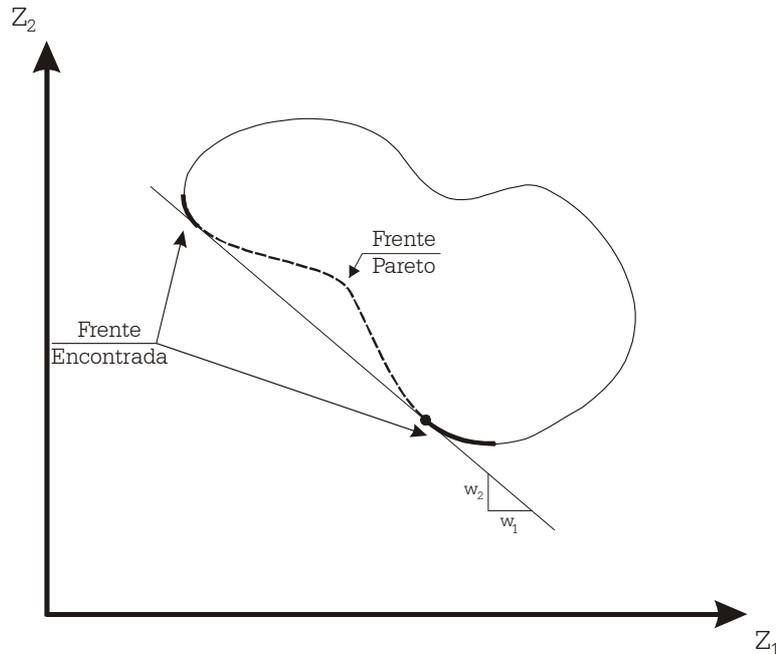


Figura 3.4 Representação do método dos pesos em um problema não convexo

3.2.2.2 Método das Restrições- ϵ

Um outro método que pode ser empregado para a solução de problemas envolvendo regiões não convexas, é o método das restrições- ϵ . Proposto por Himes et al. (1971), sugere a resolução do problema de otimização simples considerando um objetivo por vez. Os outros objetivos seriam então colocados nas restrições do problema. A representação gráfica do método das restrições- ϵ é mostrada na Figura 3.5. Matematicamente, o método consiste em se resolver o seguinte problema:

$$\text{Minimizar: } Z(\mathbf{x}) = Z_\mu(\mathbf{x}) \tag{3}$$

$$\text{sujeito a: } Z_i(\mathbf{x}) > \epsilon_i^k \quad i = 1, 2, \dots, M \text{ e } i \neq \mu; k = 1, 2, \dots, K.$$

$$\mathbf{x} \in X_f$$

sendo K o número de pontos que se deseja encontrar.

O método das restrições- ϵ apresenta vantagens sobre o método dos pesos como a possibilidade de se poder trabalhar com problemas que têm regiões não-convexas (Figura 3.5). Outra vantagem está no fato de que na maioria dos problemas, uma única solução é encontrada para cada conjunto de vetores $\epsilon = (\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_{\mu-1}, \epsilon_{\mu+1}, \dots, \epsilon_M)$. No entanto, as outras desvantagens inerentes ao método dos pesos ainda persistem (MIETTINEN, 1999).

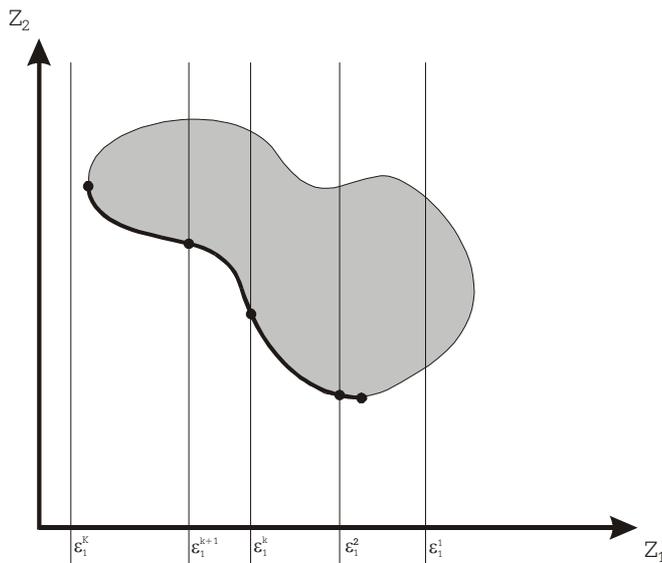


Figura 3.5 Representação do método das restrições- ϵ

De um modo geral, observa-se que a implementação dos métodos tradicionais acima apresenta problemas na obtenção da região Pareto ótima. Estas dificuldades são (ZITZLER, 1998 e DEB, 2001):

- apenas uma solução da região Pareto ótima pode ser encontrada a cada otimização;
- alguns métodos são incapazes de trabalhar com problemas apresentando regiões não convexas;
- essas metodologias requerem, de alguma forma, um conhecimento prévio, seja para a determinação dos pesos, seja para determinar as restrições- ϵ .

A primeira desvantagem é, sem dúvida, a que mais restringe a aplicação desses métodos a problemas práticos. A utilização destes processos de otimização aumenta consideravelmente o esforço computacional quando está se trabalhando com problemas com mais de 2 objetivos.

Por exemplo, caso se deseje uma discretização por objetivo de 20 pontos em um problema com 5 objetivos, o número de vezes que seria necessário empregar uma rotina de otimização seria igual a 160.000 (20^5).

Este foi o principal motivo para o desenvolvimento dos métodos iterativos, que, embora também empreguem algoritmos de otimização, requerem uma quantidade muito menor de simulações.

Na última década ocorreu o desenvolvimento de uma forma de algoritmos evolucionários aplicados na determinação de frentes não dominadas. Os métodos desenvolvidos utilizam uma vantagem desse tipo de formulação, que é trabalhar com um número grande de soluções ao mesmo tempo na busca do conjunto de soluções Pareto. O desenvolvimento desses métodos tem ocorrido de modo rápido, já tendo sido produzidos centenas de trabalhos que procuram refinar metodologias existentes e/ou criar novos métodos. No item a seguir será feito um breve apanhado sobre as principais metodologias baseadas em algoritmos evolucionários aplicadas aos problemas multiobjetivos.

3.2.3 Métodos Multiobjetivos Baseados em Algoritmos Evolucionários (MOAE)

Há mais de duas décadas que os algoritmos evolucionários (AE) vêm sendo utilizados em uma larga gama de problemas científicos, econômicos, comerciais e de engenharia. A razão para esse feito se deve principalmente à sua capacidade de lidar com os mais diversos tipos de situações em que a otimização convencional não se mostrou eficiente.

Esses algoritmos, que se enquadram na classe de métodos de otimização estocástica, tentam simular o processo natural da evolução das espécies. As bases teóricas para os AE foram postas na década de 1950 (FRASER, 1957; BOX, 1957 apud DE JONG & SPEARS, 1993). Desde então diversas técnicas evolucionárias vêm sendo desenvolvidas e aprimoradas, dentre elas os Algoritmos Genéticos (AGs) proposto por John Holland na década de 1960. Estes métodos operam com conjuntos de candidatos que são constantemente mudados utilizando dois princípios básicos da evolução: *seleção* e *variação*. Esses princípios tentam representar a competição em que os indivíduos mais aptos continuam vivos e se reproduzem passando adiante o seu código genético (DEB, 2001).

Devido à sua estratégia de trabalhar com uma gama de soluções ao mesmo tempo, os AGs são capazes de encontrar várias soluções não dominadas num único esforço de otimização. Como visto no tópico anterior, a principal dificuldade encontrada pelos métodos tradicionais de geração de frentes Pareto diz respeito à “escalabilidade” enfrentada quando se trabalha com mais de 2 objetivos. Por não apresentar um efeito de escala tão acentuado quanto os métodos convencionais e por serem capazes de trabalhar com uma gama muito grande de soluções, os AGs se tornaram uma ferramenta de otimização multiobjetivo eficiente conforme comprovam numerosos trabalhos desenvolvidos particularmente na última década.

3.2.3.1 Princípios Básicos dos Algoritmos Genéticos

Apesar de decorridos mais de 40 anos desde que foi concebida, a aplicabilidade dos AGs a problemas práticos se confirmou apenas em meados da década de 1980. Isso ocorreu em virtude, principalmente, do aumento da capacidade de processamento dos computadores, além do desenvolvimento de rotinas mais eficientes. Comparativamente com os métodos tradicionais empregados em otimização, Soares (2003) enumera as principais vantagens dos AGs como sendo:

- execução da busca a partir de um conjunto de pontos, e não apenas de um, sendo capazes de trabalhar bem em problemas com funções objetivo complexas;
- usam apenas os valores das funções objetivo e não requerem diferenciação e continuidade das mesmas;
- são facilmente adaptáveis a qualquer problema de otimização;
- podem trabalhar com um grande número de variáveis, varrendo o espaço dos objetivos de forma eficaz;
- apresentam possibilidade de se trabalhar com computação paralela;
- adaptam-se bem a problemas contínuos e discretos.

A principal desvantagem relatada diz respeito ao tempo de processamento computacional, já que os mesmos, por trabalharem com um conjunto muito grande de pontos, exigem um tempo de processamento relativamente maior.

Os AGs são compostos basicamente por dois processos (VENDHUIZEN, 1999):

1. representação das soluções;

2. seleção dos candidatos mais aptos;
3. aprimoramento das soluções, geralmente via recombinações e mutações.

Esses procedimentos são regidos de um modo geral pelo Algoritmo 3.1. Este pode ser descrito da seguinte forma.

A idéia básica dos AGS é a escolha da melhor solução em detrimento da “pior”. Fazendo analogia com os processo de seleção natural, as soluções candidatas são chamadas de *indivíduos*, sendo o conjunto dessas seleções chamado de *população*. Primeiramente, uma *população inicial* é gerada a partir de um processo aleatório. Essa população é o ponto inicial do processo evolutivo. A seguir procede-se um processo repetitivo que consiste em avaliar, selecionar, recombinar e “mutar” os indivíduos (solução), gerando novas populações de soluções. Dá-se o nome de *geração* a cada iteração desse processo. O número máximo de gerações é usualmente adotado como o critério de parada. Porém, existem outras condições como critério de parada tais como, estagnação da população e existência de um indivíduo com qualidades suficientemente satisfatórias, entre outros. O melhor indivíduo é aquele que tem a maior aptidão, seja da população final, ou de uma população dentro do processo iterativo, sendo este a solução que se procura.

Algoritmo 3.1 Algoritmo Genético

1. Geração de uma população inicial;
2. Avaliação dos indivíduos da população;
3. Seleção dos indivíduos que irão participar do processo de reprodução;
4. Recombinação dos indivíduos selecionados;
5. Mutação;
6. Repetem-se as etapas de 2 a 5 até satisfazer um critério de parada

Cada um dos processos dos AGs será detalhado a seguir.

3.2.3.1.1 Representação das Soluções

Os AGs trabalham com uma codificação específica para as variáveis de decisão, em que são aplicados os operadores de seleção, cruzamento e mutação. Dessa forma, cada variável do conjunto x_1, x_2, \dots, x_p tem que ser representada de acordo com a codificação escolhida. Escolher a representação adequada é um passo importante para que a aplicação dos AGs a um determinado problema seja bem sucedida (GEN E CHENG, 1997).

Segundo Ticona (2003), as sistemáticas de codificação mais usadas são: a binária e a real. No entanto, representações mais complexas como árvores e matrizes também são utilizadas. As variáveis codificadas são agrupadas formando uma cadeia (*string*) que representa a solução, ou indivíduo.

Representação Binária

A representação pioneira e que mais tem sido empregada nos AGs é a binária, principalmente quando se trabalha com variáveis discretas. No caso de um problema com variáveis contínuas, os códigos binários também podem ser empregados, porém, é necessário um processo de decodificação. Além disso, quando a precisão requerida é alta, a cadeia binária tende a ficar muito grande o que desfavorece fortemente o seu uso (SOARES, 2003).

Na codificação binária, um conjunto ou intervalo de variáveis é convertido para um número binário. Por exemplo, o intervalo de 0 a 10 pode ser representado, com uma discretização de 1 da seguinte forma:

0000 = 0 0001 = 1 0010 = 2 0011 = 3 1001 = 9 1010 = 10

Representação Real

A representação real tem sido muito utilizada nos últimos anos, principalmente pela possibilidade de redução do tamanho da cadeia. Esse tipo de codificação proporciona também a introdução de novos operadores.

Na codificação real a variável pode assumir o seu próprio valor, não sendo necessário nenhum processo de conversão. Para problemas discretos, pode-se também empregar uma forma inteira que é semelhante à real.

3.2.3.1.2 Seleção

No processo de *seleção*, que pode ser estocástico ou determinístico, os indivíduos de menor adaptabilidade tendem a ser removidos enquanto que os indivíduos mais aptos — as soluções com melhores valores da função objetivo num problema de otimização simples — se reproduzem passando os valores do seu código, ou variáveis de decisão, para as iterações, ou gerações, posteriores. A qualidade do indivíduo, geralmente representada por um escalar, é denominada de *aptidão*. O conceito da seleção é muito amplo e permite que diversos esquemas possam ser empregados. As principais classificações dos processos de seleção são apresentadas a seguir (BRINCKLE, 1996):

- quanto ao tamanho da população que será substituída:

Geracional e Permanente (Steady-State): no primeiro tipo o processo de seleção incide sobre toda a população, enquanto que no segundo, apenas um pequeno número de indivíduos são substituídos, através da seleção-recombinação.

- quanto à permanência de indivíduos:

Elitista e Não Elitista: em um processo geracional comum, não existe garantias de que os indivíduos “mais aptos” irão permanecer na população da geração seguinte, isto implica na possibilidade de perda de bons “espécimes”. Este tipo de abordagem é denominado *não-elitista*. Quando se cria um mecanismo que assegure a permanência das melhores soluções na iteração seguinte, diz-se que o processo é *elitista*. Esta classificação é aplicada apenas aos métodos geracionais e foi proposto originalmente por De Jong (1975) (LACERDA E CARVALHO, 1999).

Existem dois métodos principais empregados para se fazer seleção de um indivíduo, a saber: *seleção proporcional* ou *roda de roleta* (roulette) e *torneio*.

Nos métodos de *seleção proporcional* propostos por Holland (1975) a probabilidade de um indivíduo ser escolhido será função da sua aptidão, descrita pela seguinte expressão:

$$p_i = \frac{\chi_i}{\sum_{k=1}^P \chi_k} \quad (3.5)$$

em que p_i é a probabilidade de uma solução ser escolhida, χ_i é o valor da função de aptidão e P é o tamanho da população.

Na seleção por *torneio* (tournament), um grupo de t indivíduos é escolhido aleatoriamente a partir da população com ou sem reposição. As soluções escolhidas irão participar de um "torneio", em que o "vencedor" é determinado a partir do valor de sua aptidão. A "solução vencedora" é inserida na próxima população e o processo é repetido P vezes até que uma nova população seja formada. Os torneios são realizados frequentemente entre dois indivíduos ($t=2$), porém torneios com mais soluções podem ocorrer. Recomenda-se, entretanto, que o tamanho do grupo que participa dos torneios não seja grande ($t < 5$) de modo a evitar a perda de diversidade da população (BRINCKLE, 1996).

3.2.3.1.3 *Aprimoramento das soluções*

A variação das soluções é introduzida a cada geração através da *recombinação* e *mutação*. Tais operadores criam novas populações, ditas filhas, que contêm indivíduos que ocupam diferentes posições no espaço de busca. Por esse motivo, tais procedimentos são denominados de *exploratórios*. Esses processos ajudam a gerar novas soluções a partir de variações das soluções existentes. Na maioria dos métodos, o *operador de cruzamento* cria um ou dois novos indivíduos (filhos) a partir de um par de soluções (pais) já existente. Para simular a natureza estocástica da evolução, uma probabilidade de cruzamento é associada a esse operador.

O *operador de mutação* é responsável por modificar o indivíduo através de pequenas variações no seu código genético de acordo com uma *taxa de mutação*. Detalhes de alguns tipos de operadores de mutação e de recombinação são apresentados no item 4.3.2 do próximo capítulo.

3.2.3.2 **Metodologias Multiobjetivo Evolucionárias**

Existe na atualidade uma grande quantidade de metodologias que podem ser classificadas como métodos multiobjetivos evolucionários, dentre os quais:

- VEGA (Vector Evaluated Genetic Algorithm) - Schaffer (1984),
- MOGA (MultiObjective Genetic Algorithm) - Fonseca e Flammig (1993);
- NSGA (Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm) - Srinivas e Deb (1994),
- NPGA (Niche Pareto Genetic Algorithm) - Horn e Nafpliotis (1993);
- MOSES (Multiobjective Optimization of Systems in the Engineering Sciences) - Coello (1996);
- MOSGA (MultiObjective Struggle Genetic Algorithm) - Anderson e Krus (2001)
- MOGLS - MultiObjective Genetic Local Search - Jaskiewicz (2001)
- SPEA (Strength Pareto Evolutionary Algorithm) - Zitzler e Thiele (1998);
- PAES (Pareto-Archived Evolution Strategy) - Knowles e Corne (2000);
- NSGA-II (Elitist Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm) - Deb et al., (2000);

- EMOEA (Elitist Multi-Objective Evolutionary Algorithm) - Rudolph (2001);
- SPEA 2 (Improved Strength Pareto Evolutionary Algorithm) - Zitzler, Laumanns e Thiele al. (2001);

Estes, e muitos outros trabalhos, têm sido decisivos para o aperfeiçoamento das técnicas de evolucionárias aplicadas na geração de frentes Pareto. Dessas metodologias, as mais empregadas na atualidade são métodos MOGA, SPEA e NSGA (EMO2003, 2003). Além desses trabalhos, vale ressaltar o trabalho pioneiro de Schaffer (1984). Estas quatro metodologias serão detalhadas a seguir.

3.2.3.2.1 (VEGA) - Vector Evaluated Genetic Algorithm

O método de Avaliação de Vetores por Algoritmo Genético (*Vector Evaluated Genetic Algorithm - VEGA*) foi o primeiro a empregar AGs com a finalidade de se gerar uma frente Pareto. Nesta metodologia sugerida por Schaffer (1984), um AG simples foi modificado de modo a considerar um objetivo separadamente para um determinado sub conjunto de alternativas. Essa modificação, como na maioria dos métodos multiobjetivos ocorreu apenas na forma de avaliação da função de aptidão. Neste método a população total foi dividida em M sub-populações, a avaliação das soluções era feita em cada sub-grupo considerando apenas um objetivo. Assim, dentro de cada sub-populações, as soluções que melhor fossem avaliadas para o objetivo específico, apresentariam maior valor da função aptidão, ou seja, dentro de cada sub-conjunto a valoração das alternativas funcionaria como uma otimização simples (ESHELMAN E SCHAFFER, 1991)

O algoritmo VEGA apresenta como desvantagem, um processo chamado de '*speciation*', ou seja, apresenta a "evolução" na espécie de "indivíduos" muito bons em objetivos específicos, fazendo com que as soluções encontradas ao longo das iterações tendam a se concentrar em torno dos melhores valores de cada função analisada.

3.2.3.2.2 MOGA (Multiobjective Genetic Algorithm)

Um aperfeiçoamento significativo dos métodos evolucionários multiobjetivos ocorreu quase uma década após do trabalho pioneiro de Shaffer. Goldberg (1989) sugeriu, mas não implementou, um procedimento baseado na dominância para avaliar as soluções em um algoritmo multiobjetivo, de modo a dar um peso semelhante a todas as soluções não dominadas e não apenas aquelas que estivessem

próximas aos valores máximos das funções. Este conceito somente foi incorporado no Algoritmo Genético Multiobjetivo (*Multiobjective Genetic Algorithm - MOGA*) proposto por Fonseca e Flammig (1993).

A diferença do MOGA para os algoritmos genéticos comuns se dá apenas forma de avaliação das soluções (DEB, 2001). A aptidão é calculada baseada em um ranking (r) de uma alternativa, que é função do número de soluções que a dominam (n_i):

$$r_i = 1 + n_i \quad (3.6)$$

Com isso, as soluções não dominadas possuem sempre um valor de r igual a 1. Enquanto que as outras soluções podem ter os seus valores variando de 1 ao total de soluções avaliadas (P). A Figura 3.6 apresenta uma exemplificação de como os rankings são atribuídos pelo MOGA. Por este método nem todos os valores de ranking são atribuídos para as soluções (para o exemplo da Figura 3.6: 4, 5, 6 e 8 não são empregados).

Após a definição do ranking de cada alternativa, procede-se o cálculo de sua aptidão. Cabe ressaltar que embora esse exemplo trate de um processo de minimização, as *melhores soluções* dentro dos métodos evolucionários, terão os *maiores valores de aptidão*. Para o cálculo da aptidão no *MOGA*, a população é ordenada com base no ranking. Atribui-se um valor P para a aptidão (χ) da primeira alternativa, $P-1$ para a segunda, e assim por diante. A alternativa de pior ranking terá um valor de aptidão inicial igual a 1. Calcula-se, na sequência o valor médio de aptidão para cada ranking, pela seguinte formulação:

$$\bar{\chi}(r_i) = \frac{\sum \chi_i}{|r_i|} \quad (3.7)$$

em que:

$\bar{\chi}(r_i)$ é o valor médio da aptidão do ranking r_i ;

$|r_i|$ é o número de alternativas pertencentes ao ranking r_i .

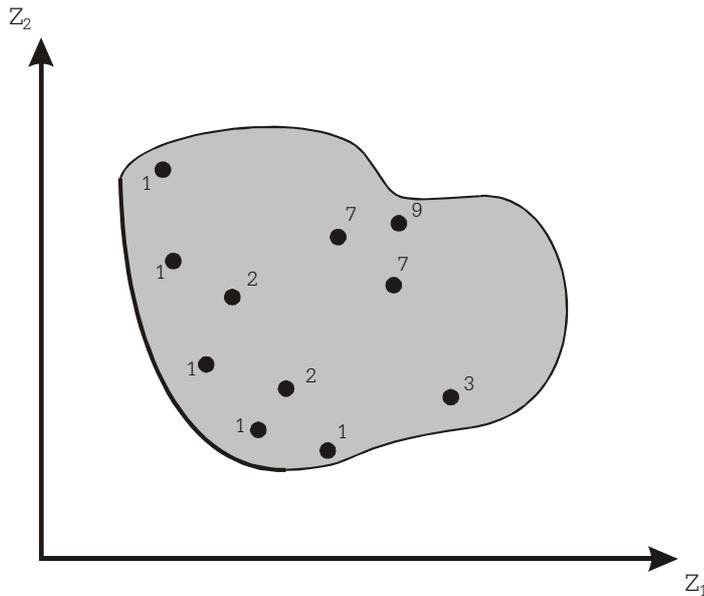


Figura 3.6 Definição do ranking no MOGA

Divisão da aptidão

O método MOGA adota um outro preceito proposto por Goldberg (1989) que é a chamada *divisão da aptidão*. A falta de diversidade nas soluções é um problema que deve ser evitado quando se requer uma busca mais ampla, que procure identificar vários ótimos, como no caso específico da análise multiobjetivos, em que se deseja definir uma frente ótima, composta, teoricamente, por infinitas soluções. Para encontrar a região Pareto ótima utilizando técnicas evolucionárias é necessário introduzir uma forma de busca onde soluções distintas dentro dessa zona possam ser encontradas. Por esse motivo, a manutenção da diversidade da população é fundamental para que o processo de otimização obtenha sucesso.

Os algoritmos genéticos tradicionais tendem a convergir para uma única solução à medida que o processo avança, não sendo, assim, capazes de achar de forma adequada a região não dominada. Para superar essa deficiência, emprega-se, entre outras técnicas, a chamada *divisão de aptidão* que é descrita a seguir:

A *divisão de aptidão (fitness sharing)* baseia-se no princípio natural de que indivíduos pertencentes à mesma região, têm que dividir os recursos locais, permitindo a manutenção da estabilidade de sub-populações (nichos). Segundo essa idéia, os indivíduos localizados na vizinhança de outro irão dividir com ele a sua aptidão. A vizinhança nesse caso, é definida em termos da distância entre dois indivíduos $d(i,j)$ e sujeita a uma zona de influência (σ_{niche}).

No MOGA a distância é medida no espaço das funções objetivos empregando uma distância Euclidiana normalizada:

$$d_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^M \frac{Z_k^i - Z_k^j}{Z_k^{max} - Z_k^{min}}} \quad (3.8)$$

O fator de divisão é calculado da seguinte forma:

$$s(d(i, j)) = \begin{cases} 1 - \left(\frac{d(i, j)}{\sigma_{\text{niche}}} \right)^c & \text{se } d(i, j) > \sigma_{\text{niche}} \\ 0 & \text{se } d(i, j) \leq \sigma_{\text{niche}} \end{cases} \quad (3.9)$$

A aptidão final, $\chi'(i)$, de um indivíduo i será uma aptidão original, $\chi(i)$, dividida por um fator de nicho:

$$\chi'(i) = \frac{\chi(i)}{\sum^S} \quad (3.10)$$

onde \sum^S é a soma dos fatores de divisão dos recursos entre a solução i e as adjacentes.

Dos métodos sem elitismo, o MOGA se mostrou um dos mais eficientes. No entanto, quando se comparam os seus resultados com os de metodologias elitistas mais recentes, verifica-se que estas apresentam uma capacidade maior de encontrar a frente Pareto, com maior diversidade de soluções (COELLO, 1999). Dos métodos elitistas desenvolvidos até o momento os mais empregados são o *NSGA-II* e o *SPEA*.

3.2.3.2.3 *NSGA-II* (Elitist Non-dominated Sorting Genetic Algorithm)

O método *NSGA-II* (Algoritmo Genético Elitista com Ordenação Não Dominada) foi proposto por Deb et al. (2000) e emprega alguns conceitos do método *NSGA* (SRINIVAS E DEB, 1994). Apesar de parecer ser uma segunda versão do *NSGA*, é uma metodologia diferente, e emprega o conceito de *elitismo*.

Elitismo

O elitismo é uma proposta original de DeJong (1975), que procura preservar, na população gerada Λ_{t+1} , os melhores indivíduos da população atual Λ_t . Em seus estudos, DeJong verificou que a adoção de alguma espécie de elitismo em algoritmos

genéticos causa um aumento da eficiência para funções unimodais, enquanto provocava uma convergência prematura em problemas multimodais (ZITZLER, 1998).

Ao contrário dos casos de objetivo simples, a incorporação do elitismo a problemas multiobjetivo é mais complexa, uma vez que a quantidade de indivíduos pertencentes à população de “elite” pode ser consideravelmente maior do que a população com que se está trabalhando, já que, para funções contínuas, a fronteira não dominada possui um número infinito de elementos.

Existem diferentes formas de se implementar o elitismo em otimizações multiobjetivos. A forma mais simples é copiar todos os indivíduos não dominados para a futura geração. Esse procedimento adiciona pouca vantagem ao processo evolucionário.

A escolha da razão entre o número de melhores indivíduos e o número apropriado de indivíduos de uma população (θ) irá influenciar sobremaneira o sucesso da busca. Se um valor elevado de θ for escolhido, haverá uma perda de diversidade da população, enquanto que se θ for pequeno, a vantagem de se utilizar uma técnica elitista será perdida (DEB, 2001).

Verificou-se que um valor de θ igual a 1, seria uma boa proporção para a quantidade de elementos da elite introduzidos na nova população (KNOWLES e CORNE, 2000). Ou seja, a nova população será composta pela mesma quantidade de indivíduos gerados e dos copiados da elite. Essa proporção é empregada na maioria das técnicas multiobjetivo baseadas em AGs elitistas.

Quando se trabalha com uma frente Pareto, os indivíduos da frente são iguais do ponto de vista matemático. Por esta razão, na escolha ou não de uma solução para compor a próxima população, leva-se em conta também fatores como a distribuição das alternativas ao longo da fronteira.

O método NSGA-II trabalha com duas populações distintas, uma população descendente (δ) que é obtida mediante a aplicação dos operadores dos AGs. A segunda população de elite (Λ) é formada pelos melhores indivíduos da geração anterior. Sendo que, essas duas populações possuem o mesmo número de indivíduos (P).

O método inicia com a geração de uma população inicial Λ_0 . Essa população é então dividida em diferentes níveis ou fronteiras de não-dominância (F_i). A aptidão de cada indivíduo será igual ao valor da frente na qual ele está localizado (Figura 3.7).

Assim, 1 significa o melhor nível. Depois de se avaliar Λ_0 aplicam-se os operadores: de seleção por torneio, cruzamento e mutação, gerando-se a população “filha” δ_0 .

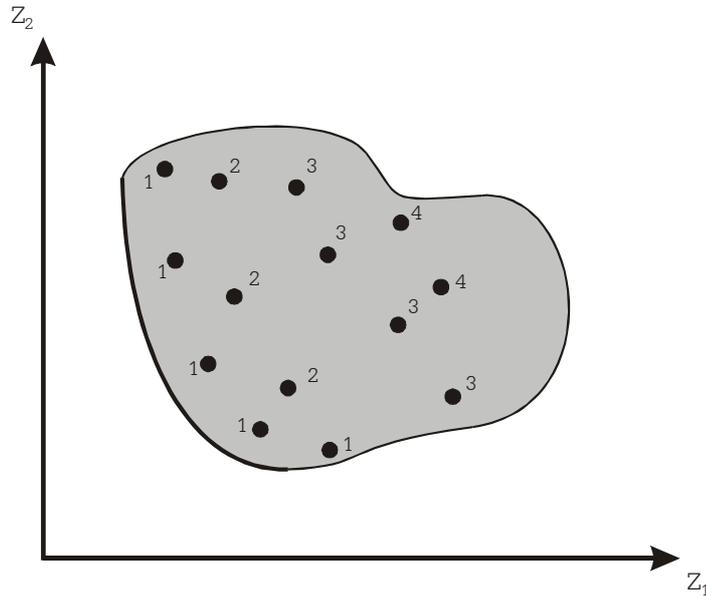


Figura 3.7 Ordenação no método NSGA-II

Uma terceira população Ψ_0 é criada como sendo:

$$\Psi_0 = \Lambda_0 \cup \delta_0 \quad (3.11)$$

onde $|\Psi_0| = 2P$. Para as demais gerações, o NSGA-II efetua as ordenações das soluções considerando Ψ_p , conforme a disposição das soluções nas diversas frentes Γ_i .

O passo seguinte será a construção da população geradora Λ_{n+1} . Como apenas P soluções podem compor Λ_{n+1} , P soluções de Ψ_p serão descartadas. O preenchimento de Ψ_p é feito inicialmente com as alternativas pertencentes à Γ_1 . segue-se o preenchimento com Γ_2 . Os conjuntos de soluções Γ_i são inseridos na sua totalidade até que:

$$\sum_{j=1}^i |\Gamma_j| \leq P. \quad (3.12)$$

Ao se inserir uma frente que não atenda (3.12), o algoritmo NSGA-II escolhe as soluções melhor distribuídas, empregando-se um critério denominado de *distância de aglomeração ou multidão*.

A distância de aglomeração (da) de uma solução reflete a densidade de alternativas localizadas à sua volta, e será igual ao perímetro do cubóide, no espaço das funções objetivos, que envolve uma solução i (Figura 3.8). Este cubóide tem em seus vértices as soluções mais próximas de sua vizinhança. Os elementos que se situarem nos extremos do nível, ou seja, aqueles que tiverem os maiores e menores valores para alguma função objetivo, terão sua distância de aglomeração igual a ∞ .

Tendo a população Λ_{n+1} sido definida, procede-se uma seleção para a geração de δ_0 . A seleção, segundo esta metodologia, é efetuada através da *seleção por torneio de multidão*. Esse torneio é realizado considerando que cada solução i possui dois atributos:

1. ranking de não-dominância r_i ;
2. distância de aglomeração da_i .

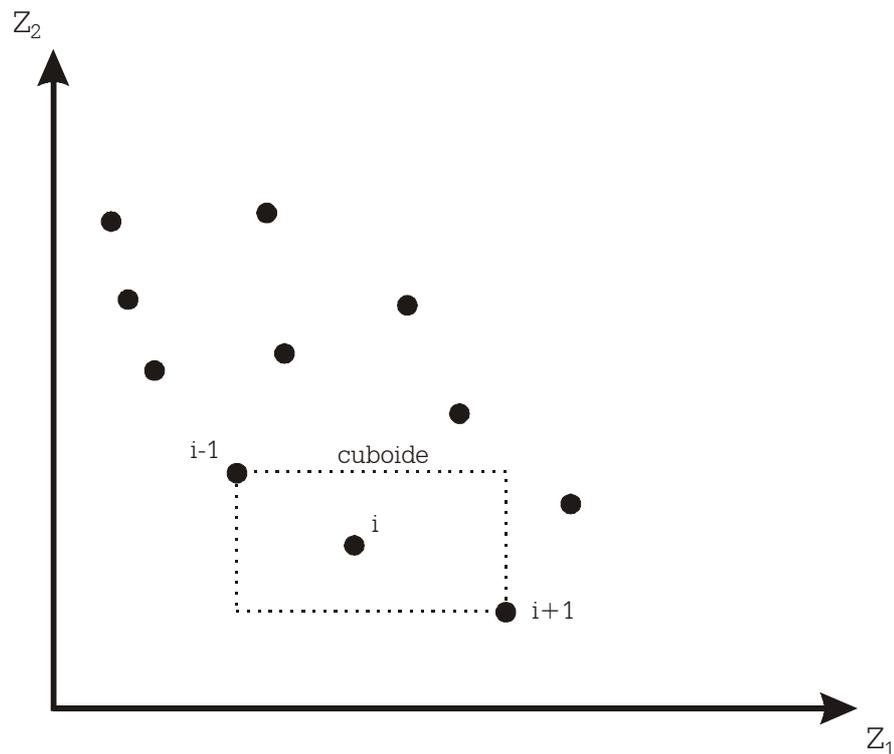


Figura 3.8 Esquema da definição de distância de multidão.

Baseado nessas duas características é realizado o torneio de seleção em que um candidato i vence um candidato j se uma das seguintes afirmações for verdadeira:

1. se a solução i numa frente (Γ_i) for menor (no caso de minimização) do que a solução j .
2. se as duas possuem o mesmo ranking, mas a solução i tem um valor de da_i maior do que da solução j .

Excetuando-se o passo inicial, descrito acima, o método NSGA-II pode ser escrito seguindo-se a Figura 3.9 e/ou o Algoritmo 3.2:

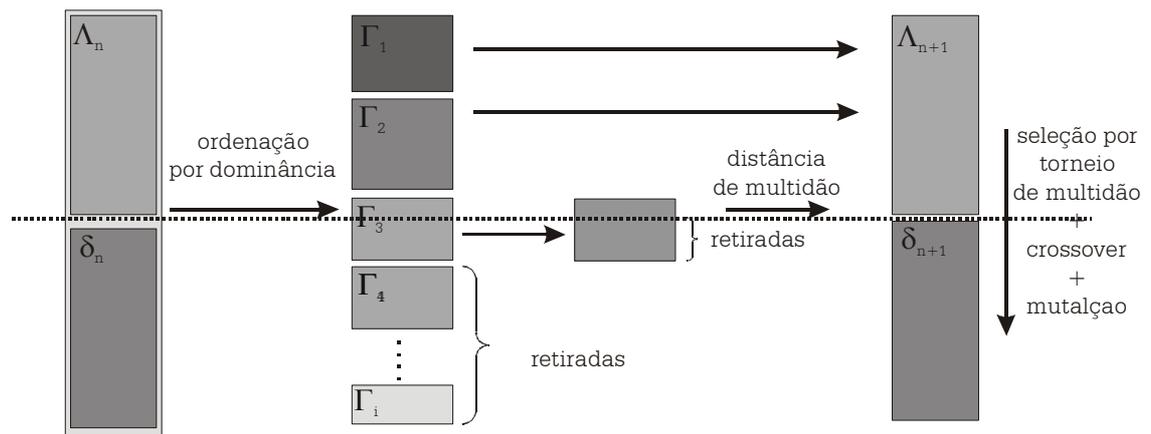


Figura 3.9 Esquema do método NSGA-II

Algoritmo 3.2 - Método NSGA-II

1. combinação das duas populações criando-se

$$\Psi_n = \Lambda_n \cup \delta_n.$$

2. determinação dos diferentes níveis (Γ_i) não dominados de Ψ_n ;
3. determinação da nova população Λ_{n+1} , obtida da seguinte forma:

$$P_{i+1} = [\phi] \text{ e } i=1;$$

enquanto $|\Lambda_{n+1}| + |\Gamma_i| < P$ faça ;

$$\Lambda_{n+1} = \Lambda_{n+1} + \Gamma_i; \quad i=i+1$$

4. determinação dos $P - |\Lambda_{n+1}|$ indivíduos restantes, utilizando a distância de aglomeração, discutida anteriormente.
5. geração da população δ_{n+1} , a partir de Λ_{n+1} , utilizando a seleção por torneio de multidão, seguindo-se de cruzamento e mutação.

3.2.3.2.4 SPEA (Strength Pareto Evolutionary Algorithm)

O algoritmo SPEA, proposto por Zitzler e Thiele (1998), considera também o elitismo por meio de uma população externa (E) onde são guardadas as soluções não dominadas encontradas ao longo do processo. O tamanho dessa população ($|E|$) é um parâmetro a ser fornecido.

Como todos os métodos baseados em AGs, o SPEA inicia gerando uma população interna (Λ_0). As soluções geradas em Λ_0 são avaliadas, e as que compõem a frente não dominada são copiadas para a população externa (\mathbf{E}). Em seguida efetua-se o cálculo das aptidões das soluções pertencentes à cada população. Esse processo de avaliação do SPEA é composto de várias etapas que serão explicitadas a seguir.

O SPEA considera também o conceito de dominância dos métodos MOGA e NSGA-II, no entanto, a forma como é calculada a aptidão de cada indivíduo é diferente. O cálculo da aptidão dessa metodologia utiliza o valor de uma variável denominada *força* (*strength*) ($\mathbf{S}(i)$). O valor de $\mathbf{S}(i)$ para um indivíduo i pertencente à população externa (\mathbf{E}) é dado por:

$$\mathbf{S}(i) = \frac{|\{j / j \in \Lambda \wedge Z(x_i) \succ Z(x_j)\}|}{P+1} \quad (3.13)$$

ou seja, a força será igual ao número de soluções pertencentes à população dominada Λ que são dominadas pelo i , dividido pelo número de soluções mais um (Figura 3.1). Esse procedimento é realizado para garantir que todas as soluções da população externa tenham um valor de aptidão menor que um.

O cálculo da aptidão de uma solução pertencente à população interna (χ_i) é feito somando-se o valor da força das soluções de \mathbf{E} que a dominam:

$$\chi_j = 1 + \sum \mathbf{S}(i) \quad (3.14)$$

o valor 1 é adicionado de forma a garantir que todas as soluções tenham um valor de aptidão maior que um.

Após a avaliação das soluções dos dois grupos de populações, procede-se à seleção dos indivíduos, por meio de um torneio dois a dois, seguido da aplicação dos operadores de recombinação e mutação.

As melhores soluções pertencentes à população gerada Λ_{n+1} são adicionadas à população externa (\mathbf{E}). Em seguida, as alternativas desse conjunto dominadas pelas novas soluções inseridas são excluídas do processo. As soluções que sobram desse procedimento são as alternativas não dominadas resultantes da combinação das populações de "novas e velhas elites" (ZITZLER, 1999).

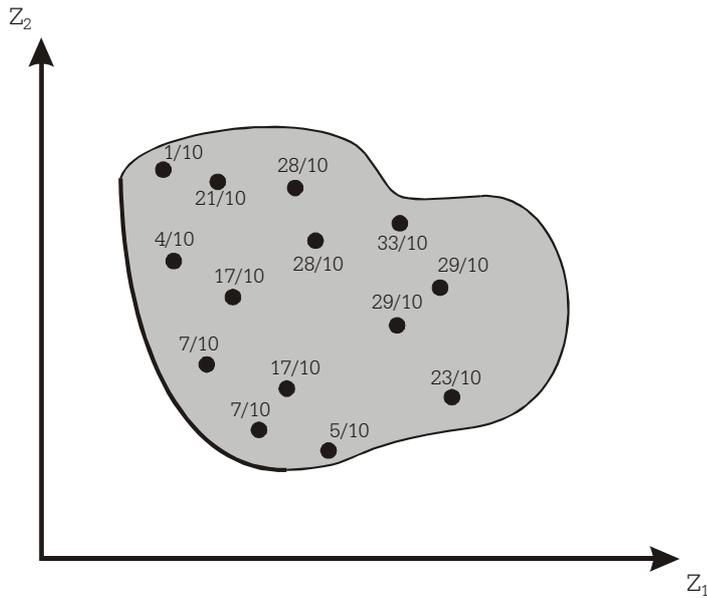


Figura 3.10 Definição da aptidão no método SPEA

Se esse processo continuar por um grande número de iterações, o tamanho da população externa pode ficar muito grande, o que não é desejável pois acarreta uma série de dificuldades que minam a capacidade do método diversificar as suas soluções. Considerando esse aspecto, foi proposto um *algoritmo de corte* que deve ser aplicado sempre que o número de indivíduos da população externa for maior que um parâmetro $|\bar{P}|$.

Algoritmo de Corte

O algoritmo de corte tem a função de reduzir o tamanho da população externa de $|\bar{P}'|$ para $|\bar{P}|$, quando $|\bar{P}'| > |\bar{P}|$ (DEB, 2001). Inicialmente, cada solução pertencente a \mathbf{E} é considerada como localizada em um agrupamento (cluster) separado. Assim existirão \bar{P} agrupamentos. Em seguida é calculada a *distância de agrupamento* entre todos os pares de agrupamentos:

$$d_{12} = \frac{1}{|\hat{C}_1| |\hat{C}_2|} \sum_{i \in \hat{C}_1, j \in \hat{C}_2} d(i, j) \quad (3.15)$$

onde d_{12} indica a distância entre dois agrupamentos \hat{C}_1 e \hat{C}_2 . E $d(i, j)$ é a distância entre duas soluções i, j pertencentes aos dois agrupamentos. Esta distância, geralmente Euclidiana, pode ser calculada no espaço de variáveis de decisão ou no espaço de objetivos, sendo que no algoritmo original, a segunda opção foi empregada.

Os dois agrupamentos com menor distância são então acondicionados em um novo agrupamento maior. Em seguida, recalculam-se as distâncias de agrupamento. Esse processo é repetido até que o número de aglomerações seja igual a \bar{P} . Em seguida, para cada agrupamento, a solução com a menor distância média para as outras soluções é mantida na população externa, sendo que as demais alternativas pertencentes àquela aglomeração são descartadas (Figura 3.11)

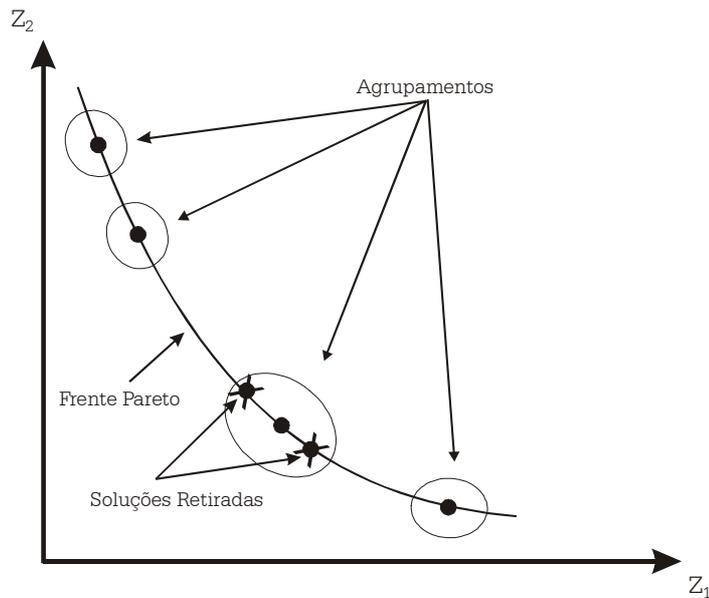


Figura 3.11 Esquema do algoritmo de corte do SPEA

3.3 Métodos Multiatributos

Todas as soluções pertencentes à frente Pareto encontradas são equivalentes do ponto de vista matemático. Entretanto, do ponto de vista da prática da Engenharia, é necessário escolher uma solução a ser implementada. Para isso, precisa-se de uma informação adicional além daquela contida nas funções objetivo. Essa informação é uma das principais diferenças dos métodos de um objetivo para os multiobjetivos.

A nova informação é adicionada ao problema pelo *tomador de decisão* (*decision maker*) que pode ser uma pessoa, ou grupos de pessoas, que se supõe ter uma maior percepção global do problema ou que pode melhor expressar as relações entre as diferentes soluções do problema (MIETTINEN, 1999). Geralmente, o tomador de decisão é o responsável pela decisão final ou, pelo financiamento do projeto.

Como já foi mencionado, para problemas com apenas dois objetivos existe certa facilidade na tomada de decisão, uma vez que as soluções podem ser dispostas graficamente. No entanto para problema maiores, não é simples por parte do decisor

escolher a solução que mais lhe compraz. Desta forma, recorre-se a metodologias que procuram extrair as preferências de quem decide tentando-se chegar à solução mais compatível com suas necessidades. Uma das formas de se chegar a essa solução é utilizando os chamados *métodos multiatributos*.

Entende-se por métodos multiatributos aqueles em que se escolhe a alternativa de maior preferência do tomador de decisões, a partir de um número *finito* de soluções. Existe na atualidade um número muito grande métodos multiatributo sendo empregados dentre os quais:

- AHP (Analytic Hierarchical Process) - Saaty (1977),
- CODASID (COncordance and Discordance Analyses by Similarity to Ideal Designs) - Sen et al. (1997);
- ELECTREs (ELimination Et Choix Tradusuant la REalité) - Roy (1968), Roy e Bertier, 1971;
- PROMETHEE (Preference Ranking Organization METHods for Enrichment Evaluations) - Brans e Vincke (1985);
- SMART (Simple MultiAttribute Rating Technique) - Edwards (1977);
- TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) - Hwang e Yoon (1981)

Os métodos multiatributos, em sua maioria utilizam conceitos como pesos para os critérios que buscam captar a preferência do decisor, apresentando, cada um em maior ou menor grau, adaptabilidade a diferentes tipos de problemas, decisores, grau de incerteza, etc (SALMINEN ET AL, 1998; ZANAKIS ET AL., 1998).

Uma classe de métodos multiatributos, que tem sido empregada com frequência em uma variada gama de problemas reais, é dos chamados métodos de *relação hierárquica (outranking relation)*. São exemplos desse tipo de métodos o ELECTRE, o PROMETHEE e o CODASID. Tais metodologias se baseiam na chamada relação hierárquica de preferência entre duas alternativas a_1 e a_2 definida por Roy (1968) como sendo uma relação binária \check{S} , em que $a_1 \check{S} a_2$ ocorre, se e somente se, dado o conhecimento das preferências do decisor, existem argumentos suficientes para decidir que a alternativa a_1 é melhor ou igual á alternativa a_2 . (VINCKE, 1992). Nos próximos itens é feito um detalhamento das duas metodologias multiatributos empregadas neste trabalho

3.3.1 Métodos ELECTRE

Os métodos ELECTRE são uma família de metodologias que teve o seu início na proposta de Roy (1967). Atualmente existem cinco diferentes versões do ELECTRE, a saber (BUCHANAN SHEPPARD E VANDERPOOTEN., 1999):

- ELECTRE I - desenvolvido para ordenar parcialmente soluções, é usado em conjunto com o ELECTRE II;
- ELECTRE II - faz a ordenação completa das soluções encontradas pelo método ELECTRE I;
- ELECTRE III - seleciona e ordena soluções baseadas em conceitos de lógica nebulosa;
- ELECTRE IV - aplicado a problemas onde não se pode fazer quantificação dos objetivos;
- ELECTRE TRI - problemas de atribuição.

3.3.1.1 Método ELECTRE III

Dos métodos multicriteriais de relação hierárquica, os modelos ELECTRE são os que apresentam uma maior quantidade de aplicações, tanto na literatura, quanto na prática (VINCKE ET. AL, 1992). Dos métodos ELECTRE, o ELECTRE III, proposto por Roy (1978), tem apresentado maior robustez, e por isso, tem sido um dos mais empregados na atualidade (MIETTINEN E SALMINEN, 1999).

Os métodos ELECTRE I e II foram desenvolvidos para trabalhar com *critérios reais* (true-criterion), em que os valores obtidos são fixos e imutáveis. Com o desenvolvimento da modelagem da preferência, alguns procedimentos foram propostos para considerar explicitamente a imprecisão e as incertezas nos valores de funções objetivo. O método ELECTRE III foi desenvolvido considerando o conceito denominado de *pseudo-critério*.

Os valores da função objetivo no pseudo-critério incorporam incertezas aos critérios do problema. Por exemplo, se duas alternativas apresentam valores $z(a_1)=11$ e $z(a_2)=12$. Considerando o conceito de critério reais, a_1 é preferível a a_2 ($a_1 P a_2$). No pseudo critério, essa alternativa depende dos *limiares (threshold) de indiferença e preferência*, fornecido pelas funções $p[Z(a_1)]$, $q[Z(a_1)]$ respectivamente. Sendo que dependendo do valor desse limiar podem ocorrer três situações:

$a_1 I a_2 - a_2$ é indiferente à a_1 se $Z(a_1) - Z(a_2) < p[Z(a_1)]$;

$a_1 Q a_2 - a_2$ é fracamente preferível à a_1 se $q[Z(a_1)] > Z(a_1) - Z(a_2) \geq p[Z(a_1)]$;

$a_1 P a_2 - a_2$ é preferível à a_1 ; se $Z(a_1) - Z(a_2) \geq q[Z(a_1)]$;

A introdução desses critérios procura simular a forma que o tomador de decisão se sente ao comparar duas alternativas quaisquer. Como é difícil definir o ponto em que o decisor passa da indiferença para a total preferência por uma alternativa, adota-se uma zona intermediária, em que o decisor hesita entre a indiferença e a preferência entre duas soluções.

O método ELECTRE III procura construir a relação hierárquica ($a_1 P a_2$) empregando esse conjunto de comparações que é implementado considerando os princípios de *concordância* e *discordância*. A concordância entre duas alternativas indica a disposição de se escolher uma alternativa a_1 ao invés da a_2 . O conceito de discordância é complementar ao de concordância e representa a insatisfação na escolha de uma alternativa em detrimento da outra. A implementação desses dois princípios será feita assumindo que todos os critérios serão *maximizados*.

Seja ω_k o peso associado a Z_k , o índice de concordância $\kappa(a_1, a_2)$ é calculado da seguinte forma:

$$\kappa(a_1, a_2) = \frac{1}{W} \sum_{k=1}^M \omega_k \kappa_k(a_1, a_2) \quad (3.16)$$

sendo:

$$W = \sum_{k=1}^M \omega_k \quad (3.17)$$

e

$$\kappa_k(a_1, a_2) = \begin{cases} 0 & \text{se } Z_k(a_1) + p_k [Z_j(a_1)] \leq Z_k(a_2) \\ 1 & \text{se } Z_k(a_1) + q_k [Z_j(a_1)] \geq Z_k(a_2) \\ \frac{p_k [Z_j(a_1)] + Z_k(a_1) - Z_k(a_2)}{p_k [Z_j(a_1)] + q_k [Z_j(a_1)]} & \text{em outro caso} \end{cases} \quad (3.18)$$

Graficamente o $\kappa_k(a_1, a_2)$ pode ser descrito conforme a Figura 3.12.

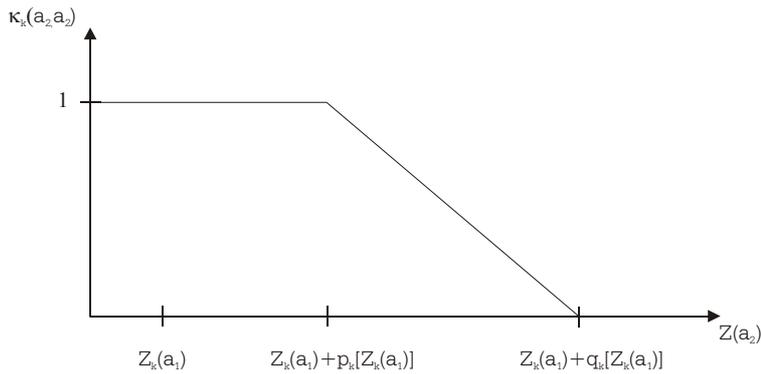


Figura 3.12 - Critério de concordância do método ELECTRE III

A definição de discordância requer a introdução de um limiar de veto $v[Z(a_1)]$ que representa a possibilidade de que $a_1 \checkmark a_2$ seja rejeitada totalmente, se para qualquer critério k :

$$Z_k(a_1) + v_k[Z_j(a_1)] \leq Z_k(a_2) \quad (3.19)$$

O índice de discordância $D_k(a_1, a_2)$ será calculado como sendo:

$$D_k(a_1, a_2) = \begin{cases} 0 & \text{se } Z_k(a_1) + p_k[Z_j(a_1)] \geq Z_k(a_2) \\ 1 & \text{se } Z_k(a_1) + v_k[Z_j(a_1)] \leq Z_k(a_2) \\ \frac{Z_k(a_2) - p_k[Z_j(a_1)] - Z_k(a_1)}{v_k[Z_j(a_1)] - p_k[Z_j(a_1)]} & \text{em outro caso} \end{cases} \quad (3.20)$$

Sendo graficamente representado pela Figura 3.13.

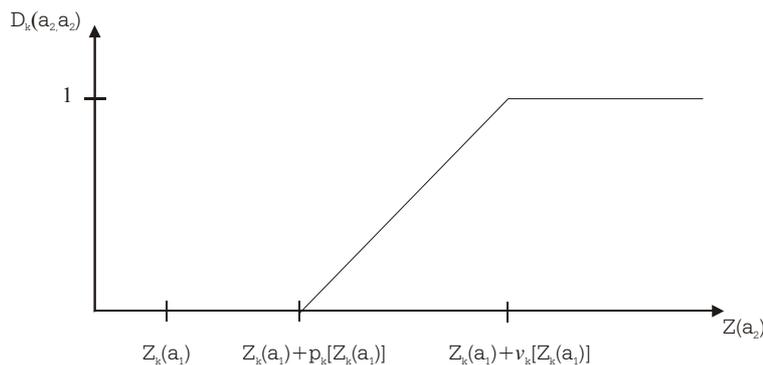


Figura 3.13 - Critério de discordância do método ELECTRE III

O passo seguinte é a construção da relação de hierarquia. O grau de hierarquia é igual ao índice de concordância quando não tem nenhum critério discordante, caso contrário, o índice de concordância é minorado em função do grau de discordância:

$$\check{S}(a_1, a_2) = \begin{cases} \kappa(a_1, a_2), & \text{se } \kappa_k(a_1, a_2) \geq D_k(a_1, a_2) \quad \forall k \\ \kappa(a_1, a_2) = \prod_{k \in K(a_1, a_2)} \frac{1 - D_k(a_1, a_2)}{1 - \kappa_k(a_1, a_2)} \end{cases} \quad (3.21)$$

em que $K(a_1, a_2)$ é o conjunto de critérios em que $\kappa_k(a_1, a_2) < D_k(a_1, a_2)$.

A próxima etapa do método ELECTRE III é a produção do ranking final utilizando as relações da matriz obtida pela equação 3.31. Para isso, serão construídas duas ordenações (progressiva e regressiva) utilizando um processo denominado de *destilação*, que, para o modo regressivo, é mostrado a seguir.

Seja:

$$\zeta = \max \check{S}(a_1, a_2) \quad (3.22)$$

Escolhe-se um valor de credibilidade ($r(\zeta)$) em que apenas os valores de $\check{S}(a_1, a_2)$ que são suficientemente próximos à ζ sejam considerados. Seja a matriz \mathbf{T} dada por:

$$\mathbf{T}(a_1, a_2) = \begin{cases} 1, & \text{se } \check{S}(a_1, a_2) > \zeta - r(\zeta) \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (3.23)$$

Definindo a qualificação da alternativa $\tau(a_i)$ como sendo o número de alternativas preteridas a a_i subtraído das alternativas preferíveis a a_i , ou seja:

$$\tau(a_i) = \sum_{k=1}^p T(a_k, a_i) - \sum_{k=1}^p T(a_i, a_k) \quad (3.24)$$

A ordenação da hierarquia será feita considerando a ordem decrescente dos valores de $\tau(a_i)$. A alternativa com maior valor de $\tau(a_i)$ é dita como sendo a primeira destilação. O processo é repetido com o conjunto restante de alternativas, (excluindo-se a solução da primeira destilação). Prossegue-se este processo até que todas as alternativas sejam ordenadas.

A ordenação progressiva é feita de modo semelhante sendo que a solução escolhida será aquela com menor valor de $\tau(a_i)$.

O método ELECTRE III é bem mais sofisticado que os predecessores, no entanto ele requer um maior conhecimento por parte do decisor da natureza do problema, e do conceito dos parâmetros do modelo. Alguns pesquisadores, no entanto, recomendam um maior refinamento no processo de ordenação final, uma vez que esse

processo pode, em muitos casos dar resultados que contradizem a intuição (VINCKE ET AL., 1992; TAKEDA, 2001).

3.3.2 Métodos PROMETHEE

O método PROMETHEE (Preference Ranking Organization METHods for Enrichment Evaluations), proposto por Brans e Vincke (1985), semelhantemente ao ELECTRE, estabelece uma estrutura de hierarquia ou preferências entre as alternativas, tentando também considerar conceitos que procurem dar alguma interpretação lógica que o torne mais fácil de entender pelo decisor (VINCKE ET AL, 1992).

Definido um peso ω_k associado ao critério Z_k , calcula-se o índice de preferência $\pi(a_1, a_2)$ de dois pares de alternativas através da seguinte equação:

$$\pi(a_1, a_2) = \frac{1}{W} \sum_{k=1}^M \omega_k \Pi_k(a_1, a_2) \quad (3.25)$$

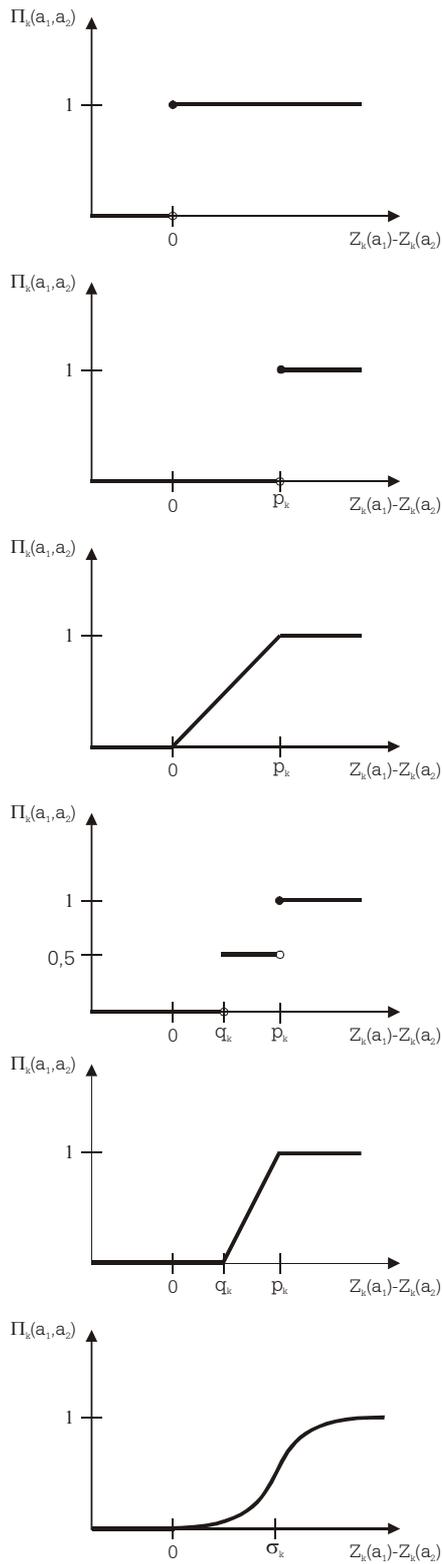
em que $\Pi_k(a_1, a_2)$ é a função de preferência que varia de 0 quando $Z_k(a_1) \leq Z_k(a_2)$ a 1 quando $Z_k(a_1) - Z_k(a_2)$ é suficientemente grande.

A função de preferência pode ser escolhida, para cada critério, entre seis tipos a serem definidos pelo decisor. Dependendo da função selecionada, será necessário estabelecerem-se também parâmetros adicionais. O conjunto de funções empregadas no método PROMETHEE é apresentado na Figura 3.14. Matematicamente as funções 1, 2 e 3 são casos específicos da função 5. No entanto, é recomendado apresentá-las separadamente para uma melhor visualização por parte do decisor (VINCKE ET AL. 1992).

O índice de preferência do método PROMETHEE é muito similar ao de concordância ELECTRE III. Se a função escolhida for função 5, eles serão idênticos. A única diferença está presente nos parâmetros, uma vez que no PROMETHEE eles são fixos enquanto que no ELECTRE eles podem ser função do valor do critério. O PROMETHEE também difere do ELECTRE por não trabalhar com o conceito de discordância.

Como no método ELECTRE são feitos dois ordenamentos denominados de *fluxo positivo* e *fluxo negativo*. O fluxo positivo $\phi^+(a)$ representa a força de uma alternativa e é dado por:

$$\phi^+(a_i) = \sum_{a \in A} \pi(a_i, a) \quad (3.26)$$



Função 1
preferência estrita (critério real)
não existe parâmetros adicionais

$$\Pi_k(a_1, a_2) = \begin{cases} 0 & Z_k(a_1) - Z_k(a_2) \leq 0 \\ 1 & Z_k(a_1) - Z_k(a_2) > 0 \end{cases}$$

Função 2
existe algum nível de indiferença que pode ser fixado
exige 1 parâmetro adicional

$$\Pi_k(a_1, a_2) = \begin{cases} 0 & Z_k(a_1) - Z_k(a_2) \leq p_k \\ 1 & Z_k(a_1) - Z_k(a_2) > p_k \end{cases}$$

Função 3
a preferência aumenta gradativamente até
exige 1 parâmetro adicional

$$\Pi_k(a_1, a_2) = \begin{cases} 0 & Z_k(a_1) - Z_k(a_2) \leq 0 \\ \frac{Z_k(a_1) - Z_k(a_2)}{p_k} & 0 < Z_k(a_1) - Z_k(a_2) \leq p_k \\ 1 & Z_k(a_1) - Z_k(a_2) > p_k \end{cases}$$

Função 4
existe um nível de indiferença e outro de preferência
que precisam ser fixados, entre esses valores, o valor
da função é 1/2
exige 2 parâmetros adicionais

$$\Pi_k(a_1, a_2) = \begin{cases} 0 & Z_k(a_1) - Z_k(a_2) \leq q_k \\ 1/2 & q_k < Z_k(a_1) - Z_k(a_2) \leq p_k \\ 1 & Z_k(a_1) - Z_k(a_2) > p_k \end{cases}$$

Função 5
existe um nível de indiferença e outro de preferência
que precisam ser fixados, entre esses valores, o valor
da função varia linearmente
exige 2 parâmetros adicionais

$$\Pi_k(a_1, a_2) = \begin{cases} 0 & Z_k(a_1) - Z_k(a_2) \leq q_k \\ \frac{[Z_k(a_1) - Z_k(a_2)] - q_k}{p_k - q_k} & q_k < Z_k(a_1) - Z_k(a_2) \leq p_k \\ 1 & Z_k(a_1) - Z_k(a_2) > p_k \end{cases}$$

Função 6
a preferência aumenta seguindo uma curva semelhante
à distribuição normal.
exige 1 parâmetro adicional

$$\Pi_k(a_1, a_2) = 1 - e^{-\frac{Z_k(a_1) - Z_k(a_2)}{2 \cdot \sigma_k}}$$

Figura 3.14 - Funções de Preferência do método PROMETHEE

enquanto que o fluxo negativo $\phi^-(a)$, que simboliza a fraqueza, é expresso por:

$$\phi^-(a_i) = \sum_{a \in A} \pi(a, a_i) \quad (3.27)$$

Com base nos valores dos fluxos são feitas as ordenações das alternativas. O método PROMETHEE I efetua uma ordenação parcial. A ordenação completa é obtida pelo PROMETHEE II.

Como neste trabalho o interesse está na ordenação total, será adotado o PROMETHEE II em que a ordenação das alternativas é feita de forma decrescente do valor de $\phi(a)$ fornecido por:

$$\phi(a_i) = \phi^+(a_i) - \phi^-(a_i) \quad (3.28)$$

4. METODOLOGIA

A abordagem multiobjetivo de um problema que envolve a tomada de decisão, no caso dos sistemas de abastecimento de água, pode ser encarada de duas formas, dependendo do estágio do processo onde ocorre a tomada de decisão:

- antes do processo de otimização;
- após o processo de otimização.

No que se refere ao dimensionamento de sistemas de abastecimento de água, a primeira abordagem requer um tempo computacional para resolução menor, empregando-se métodos de otimização mais simples para alcançar o resultado final. No entanto, este delineamento apresenta problemas de implementação devido à dificuldade de se estimar o peso de cada objetivo durante o processo decisório, uma vez que não se conhece a relação entre as funções objetivo previamente. Essa abordagem tem ainda dificuldades decorrentes de incertezas e complexidades próprias desse tipo de formulação, fazendo com que muitas vezes, em problemas não-lineares e descontínuos, as soluções obtidas não estejam nas proximidades da frente Pareto¹ (GOYCOECHEA ET AL., 1982).

Na segunda abordagem o processo decisório é iniciado a partir de soluções concretas obtidas de um algoritmo de otimização que resulta em um conjunto de soluções não-dominadas. Contudo, o tempo computacional necessário para se chegar a uma solução é significativamente maior. Após a determinação da frente de *trade-off*, procede-se então à escolha da alternativa que será então empregada. Esse processo é realizado com o auxílio de rotinas que procuram captar as preferências dos decisores com respeito aos diferentes objetivos estudados.

Os problemas relacionados ao projeto de redes de distribuição de água (RDAs) são complexos, impedindo que se conheça, *a priori*, as relações entre os diferentes objetivos. Assim, a metodologia empregada neste trabalho é balizada no segundo tipo de abordagem.

¹ Para a maioria problemas reais, envolvendo descontinuidade e não linearidade, não se pode garantir que as soluções encontradas num processo de otimização representam um ótimo global, esta afirmação pode então ser estendida de modo mais acentuado às técnicas multiobjetivos.

As diretrizes metodológicas adotadas seguidas nesta tese baseiam-se nas propostas por Neufville, Schaake e Stafford (1971), em que a solução de um problema de dimensionamento deve ser obtida em cinco partes, a saber:

- escolha dos objetivos;
- definição das funções objetivo;
- geração de alternativas;
- avaliação das alternativas;
- escolha ou ordenação das soluções do problema.

Neste procedimento, a etapa de *escolha dos objetivos* compreende a identificação dos fatores que podem interferir na escolha entre dois tipos de solução. A *definição das funções objetivo* é a etapa em que os objetivos escolhidos são quantificados de modo que se possa comparar objetivamente duas alternativas. Na *geração de alternativas*, procura-se encontrar possíveis soluções para o problema. No caso de otimização multiobjetivo, essas soluções pertencem ao conjunto de soluções não dominadas, devendo ser encontradas por um método específico. A *avaliação das alternativas* deve ser feita por um algoritmo de análise hidráulica capaz de subsidiar o cálculo das *funções objetivo*. A escolha da solução do problema é feita de modo a considerar as preferências do decisor no processo. O detalhamento dessas etapas será feito nos itens a seguir.

4.1 Escolha dos Objetivos

Por definição, as RDAs devem ser estruturas capazes de transportar eficientemente água em *quantidade* e *qualidade*, suprimindo as demandas com o *menor dispêndio possível*.

Uma forma de se atender essas premissas é através do uso de ferramentas da Pesquisa Operacional (PO). A aplicação da PO ao dimensionamento de RDAs é geralmente feita considerando até dois objetivos: *minimização dos custos* e *maximização da confiabilidade*. De modo a contemplar aspectos referentes à diminuição de perdas físicas nos sistema que serão implantados, este trabalho também procura trabalhar com um terceiro objetivo que é a minimização dos vazamentos na rede.

A minimização dos custos é o objetivo primário no dimensionamento de qualquer sistema, essa premissa não é diferente em sistemas de distribuição de água (SDAs). Mesmo quando sob concessão de empresas privadas, os SDAs são obras de

interesse público, pois influem diretamente no bem estar e na saúde da população. No entanto, em todo o mundo, o montante de recursos destinados para esses empreendimentos é cada vez mais escasso, impondo a necessidade de se utilizar os que estão disponíveis de forma mais eficiente possível. Por esse motivo, recorre-se a Análise de Sistemas para tratar o dimensionamento dessas obras, sendo a minimização dos seus custos um fator importante para a formulação do problema.

Embora seja um fator preponderante no projeto de SDAs, o custo por si só, não pode ser o norteador na definição do projeto, principalmente quando se emprega algum método de otimização. Como o cômputo de todos os custos, principalmente os indiretos, de um projeto é praticamente impossível, é necessário que existam objetivos para contrapor a minimização do valor do projeto de modo a garantir que o desenho escolhido, além de barato, também seja eficiente. O critério que tem sido adotado na maioria dos sistemas, sejam relacionados ao abastecimento de água ou não, é a maximização da confiabilidade do mesmo.

A medida da confiabilidade de um sistema exprime a capacidade do mesmo funcionar, mesmo quando da ocorrência de situações adversas como a quebra de algum componente ou o aparecimento momentâneo de uma situação de carga diferente daquela para o qual foi dimensionado. Assim, o nível de confiabilidade exigido será função da importância do sistema, e principalmente, das consequências acarretadas pela falha do mesmo.

Uma das diretrizes adotadas para o dimensionamento de RDAs é que estas sejam eficientes. Essa afirmativa está distante da realidade nos sistemas atuais que apresentam níveis de fugas por vazamentos superiores a 40%. As perdas por vazamentos nos SDAs são responsáveis por uma grande parcela da água total alocada, e dependem do estado de conservação, da manutenção e da idade do mesmo. Essas perdas, associadas ao aumento da população, são responsáveis por falhas no fornecimento de água. Na maioria dos casos, para se superar esse problema, recorre-se a uma nova fonte de abastecimento, cada vez mais distante do ponto de destino da distribuição, visto que as fontes mais próximas às cidades já estão comprometidas.

A adoção da minimização dos vazamentos como um objetivo no dimensionamento da rede, adicionará mais uma dimensão ao problema no sentido de aliviar a preocupação com a etapa de operação do mesmo.

4.2 Definição das Funções Objetivo

O segundo passo no processo de otimização é a definição das funções objetivo que refletirão os diversos aspectos intervenientes no processo decisório. Para tanto, serão consideradas nove funções objetivo dispostas em três grupos, à saber: custo, confiabilidade e vazamentos.

Por apresentar uma maior complexidade na sua definição, a determinação da confiabilidade é o objetivo que requer um maior número de funções objetivo (foram testadas sete medidas ao todo), cabendo apenas uma função a cada um dos outros grupos. O fato de se considerar nove funções não implica que estas serão empregadas simultaneamente, visto que a determinação de uma fronteira não dominada ainda é difícil para um número muito grande de funções. Ademais, objetiva-se verificar as funções que mais influenciam na escolha de uma alternativa ou outra. O detalhamento de cada grupo de funções é feito a seguir.

4.2.1 Custo

A função custo deve agrupar os gastos com os principais componentes presentes nos sistemas de distribuição de água. Esses gastos são divididos em: *custos de implantação* e *custos de operação*. Os custos de implantação são formados pelos gastos com compras e instalação de equipamentos como tubos e bombas, bem como com a construção de instalações como reservatórios. O gasto com tubos está relacionado diretamente ao diâmetro e classe de pressão dos mesmos. Como está se lidando com redes de abastecimento, em que as pressões são limitadas superiormente por norma a 50 mH₂O, embora em alguns casos possa ultrapassar os 100 mH₂O, a classe dos tubos não terá a mesma relevância que, por exemplo, em projetos de adutoras. Assim, todos os tubos empregados neste trabalho pertencem à mesma classe de pressão.

Neste trabalho, o único fator que irá influenciar no custo do tubo, , é o diâmetro. O custo do conjunto motor-bomba é diretamente ligado à vazão e à altura de adução. No entanto, a escolha específica das bombas e motores dar-se-ia apenas na fase final de projeto. Com isso, a adoção do custo do conjunto motor-bomba será feita considerando o custo da potência instalada. O custo do reservatório é definido pela altura e capacidade do reservatório. Como a capacidade é definida através de normas, este custo será então função da altura. Os gastos referentes à operação, podem ser expressos como função da energia consumida pelo conjunto motor-bomba. Esses

gastos ocorrem ao longo da vida útil do projeto, fazendo-se necessária a utilização de um coeficiente de atualização dos custos.

Os custos de implementação e operação dos sistemas de abastecimento podem ser escritos da seguinte forma:

$$C(\mathbf{d}, \mathbf{q}) = \sum_{i=1}^{NT} CT(d)_i L_i + \sum_{j=1}^{NR} CR(HR)_j HR_j + \sum_{k=1}^{NB} CB(Pot)_k Pot_k + \alpha_k \sum_{k=1}^{NB} CE_k Pot_k nh_k \quad (4.1)$$

sendo $C(\mathbf{d}, \mathbf{q})$ o custo total de implantação e operação do sistema; $CT(d)_i$ o custo por unidade de comprimento referente ao diâmetro d_i utilizado no trecho i ; L_i o comprimento do trecho i ; NT o número de trechos da rede; $CR(H)_j$ o custo unitário do reservatório relacionado com a elevação HR_j do mesmo; HR_j a elevação do reservatório j ; NR o número de reservatórios do sistema; $CB(Pot)_k$ o custo unitário do conjunto motor-bomba com potência Pot_k ; Pot_k o potência do conjunto motor-bomba k ; NB o número de conjuntos motor-bomba; α_k a taxa de atualização do custo de operação; CE_k o custo do kWh de energia referente ao conjunto k ; nh_k o número médio de horas de utilização anual do conjunto k .

Essa é a formulação mais geral do problema, podendo, em alguns casos, não constarem um ou mais termos.

4.2.2 Confiabilidade

A definição da confiabilidade nos sistemas de distribuição de água tem sido objeto de muitas pesquisas ao longo dos últimos anos. Embora tenha evoluído bastante no aspecto da determinação de uma metodologia para o cálculo do grau de confiabilidade de uma rede, estas metodologias ainda são difíceis de serem incorporadas diretamente nos processo de otimização, visto que, a quantidade de configurações analisadas seria muito grande, o que inviabilizaria a utilização de tais técnicas.

Neste trabalho foram contempladas sete diferentes formulações que procuram contornar o problema do cálculo da confiabilidade de uma RDA: *Capacidade de Atendimento*, *Resiliência*, *Entropia*, *Resilientropia*, *Expansibilidade* e *Efeito de Envelhecimento*, *Cut-Set*. Vale salientar que estes objetivos não são aplicados simultaneamente ao processo. Na primeira etapa do dimensionamento serão aplicadas as quatro primeiras funções, visto que, para o cálculo das mesmas, não será necessário se proceder nenhuma simulação adicional. As três últimas funções serão calculadas apenas para o conjunto de soluções não dominadas geradas,

servindo para aferir as médias obtidas, além de dar um suporte adicional para o decisor.

A seguir é apresentada a descrição de cada uma das funções objetivo relacionadas à confiabilidade dos sistemas.

4.2.2.1 Capacidade de Atendimento

A capacidade de atendimento, ou disponibilidade hidráulica, é a razão entre a quantidade de água disponibilizada ao sistema e a quantidade demandada pelo mesmo. Este parâmetro é fundamental para a determinação da confiabilidade do sistema, uma vez que ele afere a capacidade que uma determinada configuração de rede tem em atender uma demanda que lhe é imposta.

Como foi apresentado no item 2.2.2.2 existem diversas formulações empregadas para o cálculo da capacidade de atendimento. Neste trabalho, para a determinação da vazão atendida, empregou-se a formulação parabólica proposta por Wagner, Shamir e Marks (1998b) e Chandapilai (1991), que é expressa por:

$$\begin{aligned}
 Q_j^{Dem} = 0 & \Rightarrow h_j \leq h_j^{min} \\
 Q_j^{Dem} = Q_j^{req} \left(\frac{h_j - h_j^{min}}{h_j^{req} - h_j^{min}} \right)^{\frac{1}{n_j}} & \Rightarrow h_j^{min} < h_j < h_j^{req} \\
 Q_j^{Dem} = Q_j^{req} & \Rightarrow h_j \geq h_j^{req}
 \end{aligned} \tag{4.2}$$

sendo Q_j^{Dem} é a demanda atendida; Q_j^{req} é a demanda requerida; n_j é uma constante do nó j ; h_j é a carga hidráulica no nó j ; h_j^{min} é a carga hidráulica mínima necessária para que alguma demanda seja suprida; h_j^{req} é a carga hidráulica requerida para que a demanda seja completamente suprida.

No cálculo da capacidade de atendimento do sistema (\overline{CA}), empregou-se a formulação proposta por Gupta e Bhave (1994), que inclui os índices de atendimento, globais, locais e temporais. Essa formulação foi apresentada no Capítulo 2 e é expressa por:

$$\overline{CA} = f_t f_l \sum_{j=1}^{NN} \sum_{i=1}^T \frac{Q_i^{Dem} t_i}{Vol_{tot}^{req}} \tag{4.3}$$

em que f_t é o fator tempo e f_l é o fator local. O fator tempo é calculado pela seguinte expressão:

$$f_t = \sum_{j=1}^{NN} \sum_{k=1}^T \frac{a_j t_k}{T \cdot NN} \quad (4.4)$$

a_j será igual a 1 se vazão atendida em um nó para um período qualquer de tempo é maior ou igual que um limite aceitável e 0 no caso contrário, T é o número de períodos de simulação e t_k é o tamanho do período k .

O fator local será a média geométrica das capacidades de atendimento nos nós, ou seja:

$$f_j = \prod_{j=1}^{NN} CA_j \quad (4.5)$$

4.2.2.2 Entropia

A função *entropia* é uma medida heurística que indica o grau de distribuição do fluxo dentro da rede. Esquemas com distribuição mais uniforme das vazões, sem caminhos preferenciais de fluxo dentro do sistema terão um valor de entropia maior. Isso significa que sistemas com valores de entropia alta tenderão a ser menos susceptíveis às falhas no caso de quebra de um trecho.

As formulações de entropia desenvolvidas até o momento apresentam três desvantagens. A primeira diz respeito à falta de normalização dos valores encontrados, uma vez que o valor da função é específico para cada topologia de rede. Por exemplo, uma rede de dez trechos possui uma faixa de valores de entropia diferente de uma rede com cem. Isso dificulta a sensibilidade do projetista quanto ao nível de distribuição do sistema, pois somente com o valor da entropia não será possível determinar se a rede tem ou não uma boa distribuição de vazão dentro dos trechos. A segunda desvantagem está relacionada à escala, e é inerente à própria formulação. Por se tratar de uma função de base logarítmica os valores encontrados tendem a ser muito próximos uns dos outros o que dificulta ainda mais a interpretação dos resultados dessa função, já que duas redes com entropias iguais a 2,17 e 2,35, por exemplo, podem apresentar distribuições de vazões muito díspares.

A terceira desvantagem da função entropia é que ela não considera a capacidade do sistema no atendimento das demandas. Assim, uma configuração que atenda todas as restrições de demandas, mas que possua caminhos preferenciais, terá uma entropia menor do que outra que, não tendo atendido às demandas, possua uma disposição de vazões mais uniforme.

Mesmo apresentando as dificuldades mostradas acima, a função entropia pode ser um parâmetro razoável para a análise de sistemas de distribuição de água, desde que não seja empregada sozinha como indicador da confiabilidade do sistema.

Foram propostas várias formulações que podem ser empregadas para o cálculo da entropia. Entretanto, não existe nenhuma vantagem explícita de uma em relação às outras, sendo que todas elas têm as mesmas limitações. Assim, decidiu-se neste trabalho pelo emprego da fórmula de (AWUMAH, GOULTER e BHATT, 1991), que é dada por:

$$\hat{S} = \sum_{j=1}^N \left(\frac{Q_j}{Q_o} \right) S_j - \sum_{j=1}^N \left(\frac{Q_j}{Q_o} \right) \ln \left(\frac{Q_j}{Q_o} \right) \quad (4.6)$$

em que \hat{S} é a entropia da rede; Q_j é a demanda no nó j (em m³/s); Q_o é a soma das vazões afluentes no sistema (em m³/s) e S_j é a entropia do nó j .

4.2.2.3 Resiliência

Outra medida heurística que busca determinar o grau de confiabilidade dos sistemas de distribuição de água é a *resiliência*, proposta por Todini (2001). Esta função procura representar a capacidade da rede atender as demandas mesmo quando ocorrem situações emergenciais como quebra de tubos e aumentos de demanda. Essa formulação supre as três desvantagens encontradas na função *entropia*:

- *normalização*: os valores para todos os portes de rede são menores ou iguais a 1;
- *escala*: permite uma melhor diferenciação entre duas soluções;
- *atendimento das demandas*: a base central da resiliência é a capacidade do sistema em atender às demandas, assim, para se ter bons valores, é necessário que todas as demandas sejam atendidas.

De um modo geral a resiliência está associada ao grau de folga, ou excesso de pressão, da rede na situação de máxima demanda. Com isso, essa formulação apresenta a desvantagem de ignorar a forma como as vazões estão distribuídas dentro do sistema, que é a característica principal da entropia. Assim, uma configuração que tenha um excesso de pressão grande, mesmo que apresente caminhos preferenciais, semelhante aos sistemas ramificados, terá um alto valor de resiliência.

A formulação da resiliência (I) para sistemas de distribuição de água, que é empregada neste trabalho é dada por (TODINI, 2001):

$$I = \frac{\sum_{i=1}^{NN} Q_j (h_j - h_j^{Req})}{\sum_{k=1}^{NR} Q_k H_k - \sum_{i=1}^{NN} Q_j h_j^{Req}} \quad (4.7)$$

4.2.2.4 Resilientropia

As medidas de entropia e resiliência, embora sejam importantes para medir a confiabilidade do sistema, não conseguem expressar sozinhas a capacidade da rede funcionar sob condições adversas.

De modo a superar esse problema, Prasad e Park (2004) propuseram a introdução de um critério de distribuição da vazão considerando os diâmetros adjacentes ao nó. Essa abordagem é uma evolução em relação ao conceito de resiliência, porém tanto este método quanto da resiliência, consideraram apenas a demanda atendida pelo nó como fator para o cálculo de seu peso relativo na rede. Assim, nós que estejam localizados nas cabeceiras da rede, e que não tenham nenhuma demanda, não influirão no cálculo dessas medidas de confiabilidade.

Como forma de se considerar um conceito mais abrangente de distribuição de vazões, propõe-se neste trabalho uma formulação alternativa para a resiliência. A forma de considerar a distribuição das vazões na rede dentro da formulação da resiliência foi a incorporação do conceito de entropia. Conforme exposto no item 2.2.3.3.1, este um bom critério para se medir o nível de distribuição em um nó.

Conforme abordado anteriormente, a utilização de entropia apresenta a dificuldade de normalização dos valores. Para se contornar esse problema propõe-se que os valores encontrados sejam comparados com a situação ideal envolvendo um nó abastecido por dois trechos com vazões idênticas. Assim a entropia calculada nessa situação seria (Eq 2.46):

$$S_j = -2.[-0,5\ln(0,5)] = 0,69315 \quad (4.8)$$

A Figura 4.1 apresenta o comportamento da entropia normalizada e a razão entre as vazões, para o caso de um nó abastecido por dois trechos, em que $q_2 \geq q_1$. Um dos problemas enfrentados quando se associam dois critérios é a possibilidade de um influência excessiva que um pode ter sobre o outro, isso ocorre quando se trabalha na associação da entropia e a resiliência. Para nós abastecidos por dois trechos, quando a relação entre as vazões é pequena, ou nos casos em que apenas um trecho abastece o ponto, os valores encontrados para a entropia normalizada do nó influirão poderão

influir negativamente na função. Assim de modo a reduzir essa interferência, que pode gerar resultados não tão satisfatórios, colocou-se um limite mínimo de 0,5 para a entropia do nó (Figura 4.1).

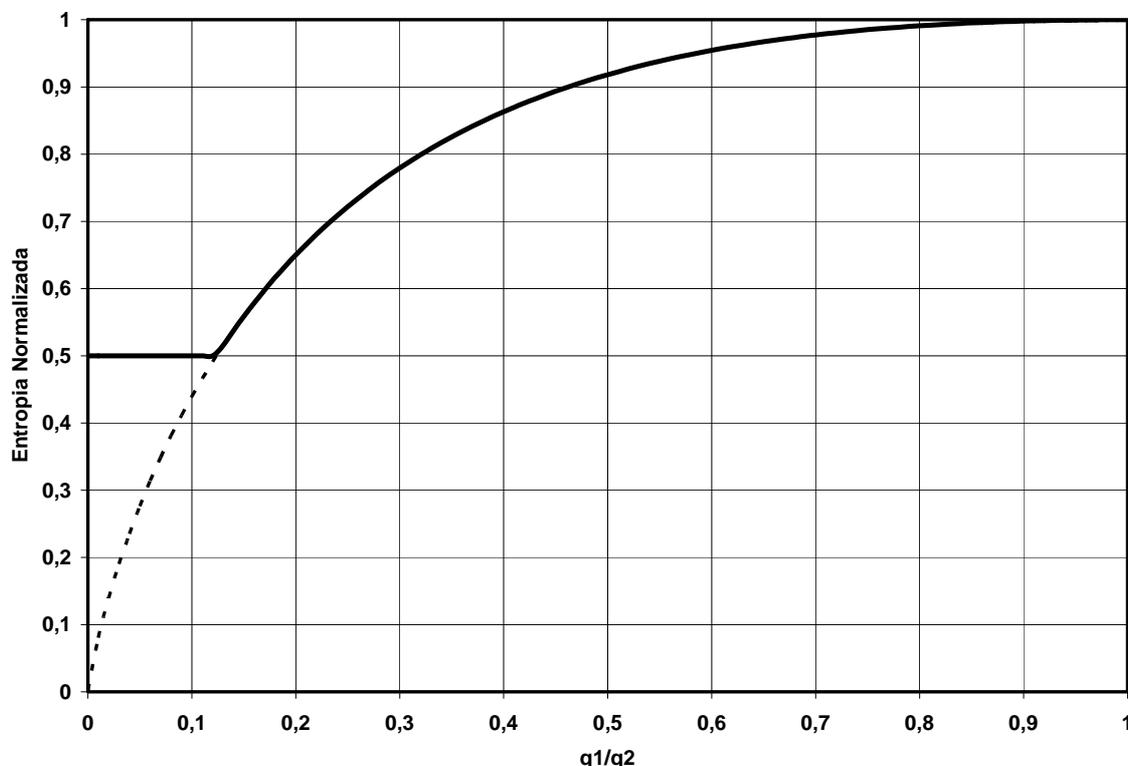


Figura 4.1 - Relação entre a entropia normalizada e a razão das vazões de dois trechos ($q_2 \geq q_1$)

Quando um nó é abastecido por mais de dois trechos, os valores da entropia normalizada poderão ser maiores do que 1. Essa situação é desejável pois o grau de confiabilidade desse ponto é alto e deve ser refletido pela formulação. Cabe uma ressalva para casos em que as demandas nos nós não forem completamente atendidas. Nessas situações, o valor da entropia não deve ser superior a 1 pois mascararia a situação do suprimento daquela junção.

Ainda com relação ao método, será levado em conta além da disposição vazão afluente ao nó a distribuição da vazão defluente. Essa consideração é importante principalmente para redes que são divididas em subsistemas, como a rede do Bessa, que será vista adiante. Essa característica reforça ainda mais a importância da distribuição do fluxo, não apenas no abastecimento de um nó específico, mas também globalmente no sistema. O cálculo da resiliência é feito da seguinte forma.

Seja v_{1j} a razão entre o fluxo afluente ao nó j e o fluxo total da rede:

$$v_{1j} = \sum_{i=1}^{n_1(j)} \left(\frac{q_{ij}}{Q_o} \right) \quad (4.9)$$

em que $n_1(j)$ é o número de trechos com fluxos afluente ao nó j .

Seja v_{2j} a razão entre as vazões defluente do nó j , incluindo a demanda atendida, a soma das vazões de todos os trechos da rede:

$$v_{2j} = \sum_{i=1}^{n_2(j)} \left(\frac{q_{ij}}{Q_o} \right) + Q_j \quad (4.10)$$

em que $n_2(j)$ é o número de trechos com fluxos saindo do nó j . Considere ainda $|S_{1j}|$ e $|S_{2j}|$ como medida da distribuição dos fluxos afluente e defluente no nó j :

$$|S_{1j}| = -\frac{1}{0,69315} \sum_{i=1}^{n_1(j)} \left(\frac{q_{ij}}{\Sigma q_{1j}} \right) \ln \left(\frac{q_{ij}}{\Sigma q_{1j}} \right) \quad (4.11)$$

$$|S_{2j}| = -\frac{1}{0,69315} \sum_{i=1}^{n_2(j)} \left(\frac{q_{ij}}{\Sigma q_{2j}} \right) \ln \left(\frac{q_{2ij}}{\Sigma q_{2j}} \right) \quad (4.12)$$

em que q_{1j} e q_{2j} indicam as vazões dos trechos afluente e defluente respectivamente.

Considerando as prerrogativas colocadas acima, propõe-se uma medida que procura agrupar os dois fenômenos que interferem na confiabilidade da rede, denominada *resilientropia*, expressa por:

$$IS = \frac{\sum_{j=1}^{NN} is_j Q_j (H_j - H_j^{Req})}{\sum_{k=1}^{NR} Q_k H_k - \sum_{j=1}^{NN} Q_j H_j^{Req}} \quad (4.13)$$

sendo is_j o coeficiente de distribuição do nó j , fornecido por:

$$\begin{aligned} is_j &= \left(\frac{v_{1j}}{2} + \frac{v_{2j}}{2} \right) 0.5 & se & \quad |S_{1j}| < 0,5; \quad |S_{2j}| < 0,5 \quad e \quad (h_j - h_j^{Req}) \geq 0 \\ is_j &= v_{1j} |S_{1j}| & se & \quad |S_{1j}| \geq 0,5; \quad |S_{2j}| < 0,5 \quad e \quad (h_j - h_j^{Req}) \geq 0 \\ is_j &= v_{2j} |S_{2j}| & se & \quad |S_{2j}| \geq 0,5; \quad |S_{1j}| < 0,5 \quad e \quad (h_j - h_j^{Req}) \geq 0 \\ is_j &= \frac{v_{1j} |S_{1j}| + v_{2j} |S_{2j}|}{2} & se & \quad |S_{1j}| \geq 0,5; \quad |S_{2j}| \geq 0,5 \quad e \quad (h_j - h_j^{Req}) \geq 0 \\ is_j &= 1 & se & \quad (h_j - h_j^{Req}) < 0 \end{aligned} \quad (4.14)$$

4.2.2.5 Expansibilidade e Efeitos do Envelhecimento

As funções relacionadas à confiabilidade apresentadas nos itens anteriores serão aplicadas diretamente dentro do processo de geração da frente Pareto. As outras funções (expansibilidade, efeito de envelhecimento e cut-set) serão empregadas, para ordenar as alternativas geradas segundo a preferência do decisor apenas na etapa posterior.

As configurações das redes pertencentes à frente não dominada foram avaliadas considerando dois novos cenários. O primeiro simula a influência do *envelhecimento da tubulação* e o segundo, verifica quais os efeitos de um acréscimo de vazão além do previsto pelo projeto (expansibilidade).

Para o cenário de envelhecimento efetuou-se a análise hidráulica da rede levando-se em conta um aumento de rugosidade. Para tubulações de Ferro Fundido que têm uma rugosidade de 0,1 mm, tomou-se que esta poderia chegar ao valor limite de 4mm (PORTO, 1998) após um longo período de uso. Para os tubos de PVC que possuem rugosidade média de 0,015 mm, considerou-se que a mesma poderia atingir 0,5 mm. O parâmetro Efeito do Envelhecimento (ENV) seria tomado como sendo igual à nova Capacidade de Atendimento encontrada após a simulação com as novas rugosidades dos tubos.

O segundo cenário, denominado Expansibilidade (EXPA), verifica o efeito de um aumento populacional além do esperado, ou a possibilidade de conexão de novos usuários que também não previstos no projeto. Arbitrou-se que o critério Expansibilidade será a CA do sistema quando submetido a um aumento das demandas de 40%.

4.2.2.6 Cut-Set

A confiabilidade total do sistema é função das taxas de quebra dos equipamentos da rede e da confiabilidade hidráulica resultante dos nós quando ocorre a quebra em um equipamento. Para se calcular o valor da confiabilidade, é necessário efetuar a análise hidráulica da rede pelo menos m vezes, sendo m o número de tubulações do sistema.

Dentre as metodologias usadas para analisar a influência das falhas no comportamento da rede com vistas à avaliação da confiabilidade, o método do *mínimo cut-set* proposto por Su et al (1987) e aperfeiçoado posteriormente por Fujiwara e De

Silva (1990), é o que apresenta maior aceitação na atualidade (SHINSTINE, AHMED e LANSEY, 2002).

A versão do mínimo *cut-set* a ser utilizada neste trabalho é proposta por Tanyimboh, Tabesh e Burrows (2001) que agrupa a confiabilidade hidráulica com uma função da demanda dirigida pela pressão, sendo expressa por:

$$CF = CM_{TOT} \left[\overline{CA}(\emptyset) + \sum_{i=1}^{NS} \overline{CA}(\mathbf{S}_i) \prod_{i \in \mathbf{S}_i} \frac{RM_i}{CM_i} \right] \quad (4.15)$$

em que CM_{TOT} é probabilidade de todos os componentes estarem operacionais; CM_i confiabilidade mecânica do componente i ; RM_i risco de falha mecânica do componente i ; $CA_j(\emptyset)$ é a capacidade de atendimento da rede em perfeito estado operacional e $CA_j(\mathbf{S}_i)$ a capacidade de atendimento do no j caso o componente i apresente falha.

O valor da confiabilidade calculado dessa forma corresponde o valor do limite inferior (CF_-). Esse valor tenderá ao valor real da confiabilidade à medida que mais subconjuntos são calculados, porém, a quantidade de situações a serem avaliadas aumenta exponencialmente. Por exemplo, para a rede do Bairro do Bessa em João Pessoa, considerada nesse trabalho, que possui 72 trechos, considerando a ocorrência de apenas uma quebra, serão analisadas 70 configurações; para duas quebras simultâneas, o número de situações será de 4.671; para três, esse valor é maior que 305.000; e para quatro é superior a 2.150.000. Com isso, é inviável se fazer uma análise considerando mais de duas quebras simultâneas em sistemas reais.

No entanto, pode-se verificar o grau de erro com que se está lidando através da determinação do limite superior da confiabilidade. A forma de se calcular o limite superior da confiabilidade é através da avaliação do risco de falha (RF) do sistema. Teoricamente, o risco é definido como:

$$RF = 1 - CF \quad (4.16)$$

De modo análogo ao que foi feito para a confiabilidade, o risco do sistema pode ser determinado como sendo:

$$RS = CM_{TOT} \left[RA(\emptyset) + \sum_{i=1}^{NT} RA(\mathbf{S}_i) \frac{RM_i}{CM_i} + \sum_{i=1}^{NT} \sum_{k \neq i} RA(\mathbf{S}_{i,k}) \frac{RM_i}{CM_i} \frac{RM_k}{CM_k} \right] \quad (4.17)$$

em que

$$RA = 1 - CA \quad (4.18)$$

$$RA(\emptyset) = 1 - CA(\emptyset)$$

O limite superior da confiabilidade (CF_+) será dado então por:

$$CF_+ = 1 - RS \quad (4.19)$$

Após a obtenção dos limites superiores e inferiores da confiabilidade considerando até duas quebras simultâneas na tubulação, pode-se inferir o valor mais provável da confiabilidade, que será o ponto de interseção das duas curvas obtidas a partir de uma regressão dos valores das confiabilidade superior e inferior e o número de falhas simultâneas dos componentes. Para o cálculo desse ponto considera-se um comportamento assintótico (Figura 4.2) expresso por uma equação de dois parâmetros:

$$CF = \frac{\mathcal{G}_1}{10^{nf}} + \mathcal{G}_3 \quad (4.20)$$

em que \mathcal{G}_i são os parâmetros da equação, obtidos através de regressão; nf é o número de trechos com falhas simultâneas.

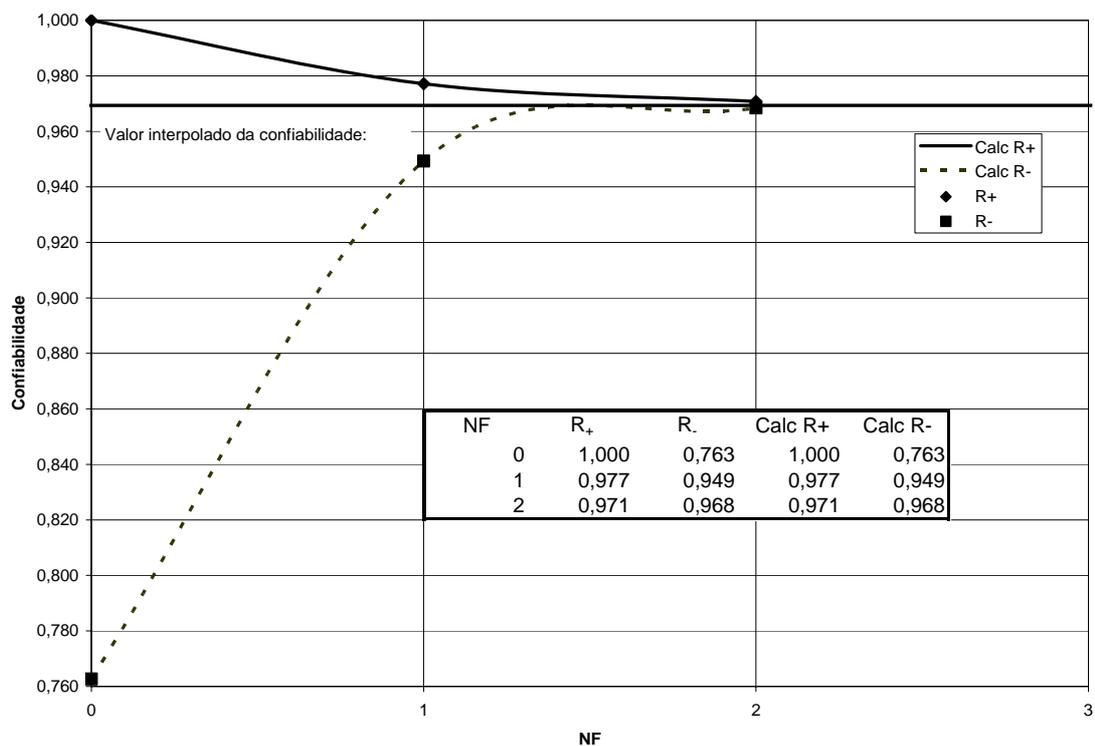


Figura 4.2 - Exemplo do comportamento esperado para os limites superior e inferior da confiabilidade

Conforme ressaltado no Capítulo 2, a confiabilidade em si não é um bom parâmetro para avaliar a capacidade de um sistema funcionar em situações de falha, principalmente quando se lida com valores de confiabilidade altos. Por esse motivo, a formulação empregada neste trabalho é medida denominada de *tolerância* do sistema à falha proposta por Tanyimboh, Tabesh e Burrows (2001) que é expressa por:

$$TL = \frac{CF - \overline{CA}(\emptyset)CM_{TOT}}{1 - \overline{CA}(\emptyset)CM_{TOT}} \quad (4.21)$$

A função adotada para representar a probabilidade de quebra da tubulação e que é utilizada para o cálculo de CM foi a proposta por Cullinane (1986), obtida a partir da observação das frequências de quebras das tubulações de redes de St. Louis. A formulação, adaptada para unidades do sistema métrico, é a seguinte:

$$CM = \frac{0,002112 D^{1,1462131}}{0,000301 D^{0,245} + 0,002112 D^{1,1462131}} \quad (4.22)$$

4.2.3 Vazamentos

A inclusão da minimização das perdas de água como um critério de projeto procura trazer para o dimensionamento uma preocupação operacional que é a redução os vazamentos na rede. Dentre os fatores que influem nas perdas físicas do sistema, a pressão na rede é aquele que apresenta maior significância. O controle das pressões excessivas nas redes de distribuição de água é assim uma forma de se diminuir a quantidade de água perdida nos SDAs, principalmente naqueles com elevados desníveis topográficos, que sofrem problemas perdas em consequência de ruptura das tubulações devido à elevada carga hidráulica.

A instalação de válvulas redutoras de pressão (VRP) na rede tem sido a alternativa mais empregada para se controlar as pressões nas redes e conseqüentemente reduzir a taxa de vazamentos. Neste trabalho procurou-se fazer a localização das VRPs, bem como o seu ajuste, ainda na fase de projeto, dimensionando a tubulação do sistema de modo que funcione conjuntamente com esse dispositivo. Essa não é uma prática usual, visto que, frequentemente, as VRPs são alocadas nas redes já em funcionamento, que foram projetadas, muitas vezes, sem levar em conta esses dispositivos.

A formulação adotada para modelar o vazamento nas redes como uma função das pressões nas redes foi proposta por Tucciarelli, Criminisi e Termini (1999). Esta abordagem apresenta vantagens computacionais e de modelação (item 2.3.1.4) e é expressa por:

$$Vaz_j = (h_j - z_j)^{\theta_j} \sum_{i=1}^{M_j} \varphi_{ji} \frac{\pi}{2} D_{ji} L_{ji} \quad (4.23)$$

O conceito de minimização dos vazamentos será abordado em todas as redes, embora a alocação das VRPs seja feita apenas para um dos três sistemas empregados.

4.3 Geração de Alternativas

O conjunto de alternativas pertencentes ao conjunto Pareto é obtido através da utilização de metodologias de otimização específicas. Como comentado no Capítulo 3, os métodos evolucionários são um grande avanço nas técnicas de geração de frentes não-dominadas, visto que permitem encontrar um conjunto Pareto de modo eficiente. A escolha de um método evolucionário de geração de fronteiras Pareto é uma tarefa difícil, em virtude da existência de dezenas de metodologias que foram desenvolvidas nos últimos anos.

Como os métodos de geração de frentes Pareto são apenas ferramentas, não está previsto no escopo deste trabalho a comparação entre diferentes metodologias multiobjetivo, de modo a verificar qual seria “a melhor” para o problema. Deve-se ter, porém, um conhecimento das características dos mesmos, de modo a empregá-los bem. Dito isto, metodologias selecionados foram os métodos SPEA (*Strength Pareto Evolutionary Algorithm*, ZITZLER, 1999) e NSGA-II (*Elitist Non-dominated Sorting Genetic Algorithm*, DEB, 2001). Essa opção ocorreu por dois motivos:

- estes métodos têm sido empregados em diferentes áreas, tornando-se as técnicas utilizadas quando se quer fazer comparação com novos métodos,
- eles pertencem a 2ª geração das metodologias multiobjetivos, uma vez que incluem um mecanismo de elitismo (DEB, 2001).

O emprego dos métodos SPEA e NSGA-II foi feito através da biblioteca para C++, MOMHLib++, desenvolvida por Jaskiewicz (2002), que também possui outros algoritmos evolucionários multiobjetivo implementados. Uma das características desta biblioteca, que tem o seu código livre e é gratuita, é que nela a implementação apenas dos procedimentos internos do método (escolha das soluções, torneio, etc), os códigos de mutação e recombinação devem ser programados pelo usuário, ficando a seu cargo a escolha dos operadores a serem usados. Uma descrição detalhada dos métodos NSGA-II e SPEA é apresentada no Capítulo 3.

A escolha dos operadores dos algoritmos empregados neste trabalho foi feita a partir do tipo de codificação adotada para as variáveis de decisão (código inteiro). A descrição detalhada dos operadores empregados é feita a seguir.

4.3.1 Operadores AGs

Os métodos multiobjetivos utilizados neste trabalho empregam como operador de seleção, o *torneio*. Os outros operadores empregados, *mutação* e de *recombinação* (“*crossover*”), serão escolhidos em função do problema e do tipo de codificação utilizado, de modo a determinar o par de operadores mais eficaz. Com base nas características do problema foram testados 2 diferentes operadores de mutação – Randômico e Não Uniforme – e 3 operadores de recombinação (Crossover) – BLX- α , Naive e Uniforme.

4.3.1.1 Operadores de Mutação

Os operadores de mutação são responsáveis pela diversificação das soluções, evitando que ocorra uma convergência prematura da fronteira Pareto. Assim, este operador é responsável pela manutenção da diversidade do conjunto de soluções.

Os operadores de mutação empregados em problemas multiobjetivo são idênticos aos utilizados em AGs que trabalham com otimização simples. Para este tipo de codificação usado, inteiro, foram escolhidos dois operadores de mutação, um *randômico* e o outro *não uniforme*, descritos a seguir.

4.3.1.1.1 Operador de Mutação Randômico

Essa formulação foi proposta por Michalewicz (1992) e consiste no operador mais simples para codificação inteira. Seja uma solução i qualquer do problema, numa geração, ou iteração t , dada pela seguinte codificação (Figura 4.3):

$$\boxed{x_1^{(i,t)}} \boxed{x_2^{(i,t)}} \boxed{x_3^{(i,t)}} \boxed{x_4^{(i,t)}} \dots \boxed{x_n^{(i,t)}}$$

Figura 4.3 – Exemplo de uma solução com codificação inteira

Sejam ainda $x_k^{(U)}$ e $x_k^{(L)}$ os valores superiores e inferiores assumidos pela variável x_k no problema. O operador de mutação randômico dado pela formulação a seguir, efetuará a seguinte modificação no valor de $x_k^{(i,t)}$:

$$x_k^{(i,t+1)} = r_k (x_k^{(U)} - x_k^{(L)}) \tag{4.24}$$

em que r_k é um número randômico entre 0 e 1. Este operador é independente da solução original $x_k^{(i,t)}$ e é equivalente a uma inicialização do problema.

A escolha de uma variável x_k , para sofrer mutação será feita com base na probabilidade de mutação, Neste trabalho, adotou-se um valor fixo para essa probabilidade que foi de 0,05.

4.3.1.1.2 Operador de Mutação Não Uniforme

Ao invés de procurar a solução em todo o espaço de soluções possíveis desprezando-se completamente a solução original, como no caso do operador randômico, a solução, por este método, será modificada levando-se em consideração o valor da variável na iteração. Este operador leva em conta também o número de iterações transcorrido no problema, em que a probabilidade de haver grandes mudanças no valor da variável diminua à medida que o número de iterações cresce. A formulação do operador de mutação não-uniforme será (DEB, 2001):

$$x_k^{(i,t+1)} = x_k^{(i,t)} + \tau(x_k^{(U)} - x_k^{(L)})(1 - r_k^{(1-t/t_{max})^b}) \quad (4.25)$$

onde τ é um valor booleano tomado como sendo -1 ou 1, com probabilidades iguais de ocorrência; t_{max} é o número máximo de iterações ou gerações e b é um expoente tomado, neste trabalho, como sendo 1.

4.3.1.2 Operadores de Recombinação

O operador de recombinação tem como objetivo formar, ou gerar, a partir de duas ou mais soluções precedentes, uma solução que apresenta características melhores do que as antecessoras. A escolha das soluções que irão fazer parte da recombinação, ou crossover, é feita através do operador de seleção. Como no caso da mutação, os operadores de recombinação empregados em problemas multiobjetivos são iguais aos empregados em AGs simples. Os operadores de mutação estudados neste trabalho são apresentados a seguir.

4.3.1.2.1 Operador de Recombinação Naive

Este operador é similar aos utilizados para codificação binária. Ele consiste, basicamente, em seccionar uma solução em um local, definido aleatoriamente, e então trocar as variáveis entre as duas soluções predecessores a partir desse ponto, gerando duas novas soluções. O esquema do operador Naive é apresentado na Figura 4.4.

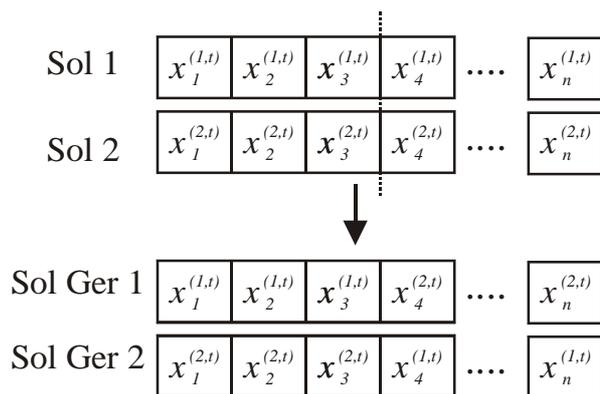


Figura 4.4 - Processo utilizado pelo Operador de Recombinação Naive

O operador Naive apresentado na Figura 4.2 é chamado de *1 ponto*, visto que as soluções originárias são seccionadas em apenas um lugar. Existem outros operadores que fracionam as soluções em 2, 3, 4 ou mais pontos, porém neste trabalho empregou-se apenas o de *1 ponto*.

4.3.1.2.2 Operador de Recombinação BLX- α

Eshelman e Shaffer (1993) propuseram um outro tipo de operador de recombinação denominado *Blend Crossover* (BLX- α). Neste esquema a variável selecionada pelo operador, $x_k^{(1,t+1)}$, será calculada dentro de um intervalo compreendido por:

$$\left[x_k^{(1,t)} - \alpha(x_k^{(2,t)} - x_k^{(1,t)}), x_k^{(2,t)} + \theta(x_k^{(2,t)} - x_k^{(1,t)}) \right] \quad (4.26)$$

onde $x_k^{(2,t)} > x_k^{(1,t)}$.

Assim, o valor novo da variável obtida na nova iteração será:

$$x_k^{(1,t+1)} = (1 - \gamma_k)x_k^{(1,t+1)} + \gamma_k x_k^{(2,t)} \quad (4.27)$$

onde:

$$\gamma_k = (1 + 2\alpha)r_k - \alpha \quad (4.28)$$

Se α for igual a 0, o operador cria uma solução aleatória localizada no intervalo entre $[x_k^{(1,t)}, x_k^{(2,t)}]$. Deb (2001) e Lacerda e Carvalho (1999) recomendam que α seja tomado como sendo 0,5.

Uma propriedade interessante do operador BLX- α , é o fato de que a localização do novo valor da variável está relacionada com a posição das alternativas que geram. Se a distância entre as alternativas for pequena, teoricamente a diferença

destas para solução gerada será pequena e vice-versa. Essa propriedade permite que uma busca de boas soluções seja efetuada de maneira mais eficiente, quando comparada a outros métodos, como o Naive.

4.3.1.2.3 Operador de Recombinação Uniforme

O terceiro tipo de operador de mutação utilizado é denominado Recombinação Uniforme. Neste método, gera-se um número aleatório binário com comprimento igual ao número de variáveis do problema. Se o valor do aleatório for 1, o valor da variável da *solução gerada* será o valor da *solução geradora 1*, caso contrário, o valor da *solução gerada* será tomado como sendo o valor da *solução geradora 2*. Esse tipo de recombinação difere do Naive por considerar sempre que a nova solução tenderá a ser formada por partes iguais das soluções geradoras. A Figura 4.5 ilustra o procedimento empregado no método de recombinação Uniforme.

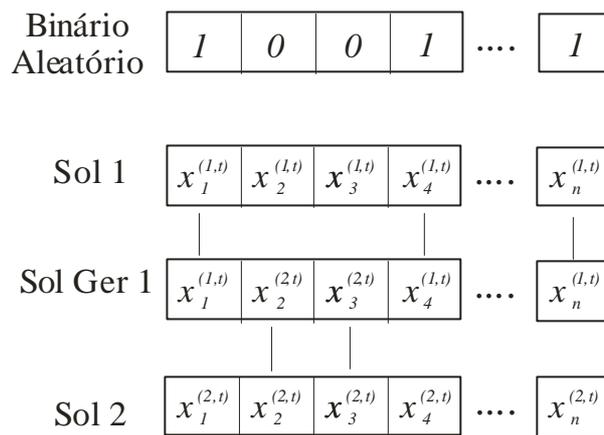


Figura 4.5 - Esquema do Operador de Recombinação Uniforme

4.3.2 Métricas de Desempenho

Quando uma nova classe de métodos é desenvolvida para resolver problemas de busca e otimização, recorre-se inicialmente a um tipo de visualização gráfica como forma de mostrar a sua adequação na resolução do problema proposto. Quando esses métodos tornam-se difundidos, existindo um número elevado de implementações, é necessário desenvolver parâmetros para comparar os resultados obtidos pelas diferentes métodos (KNOWLES e CORNE, 2001).

Os métodos multiobjetivos de geração de conjuntos de soluções não-dominadas têm dois pressupostos distintos:

1. encontrar um conjunto de soluções o mais próximo possível do conjunto Pareto-Ótimo;

- encontrar um conjunto de soluções o mais diverso possível de modo a abranger toda a frente de elementos.

Desse modo, o conjunto ideal seria aquele que apresentasse uma boa convergência para a frente, com soluções distribuídas ao longo de toda a fronteira (Figura 4.6a). Métodos que resultem em soluções bem distribuídas, porém com uma convergência pobre (Figura 4.6b), ou que apresentem uma boa convergência mas que tenham as soluções concentradas em alguns poucos pontos da frente, não são desejáveis (Figura 4.6c).

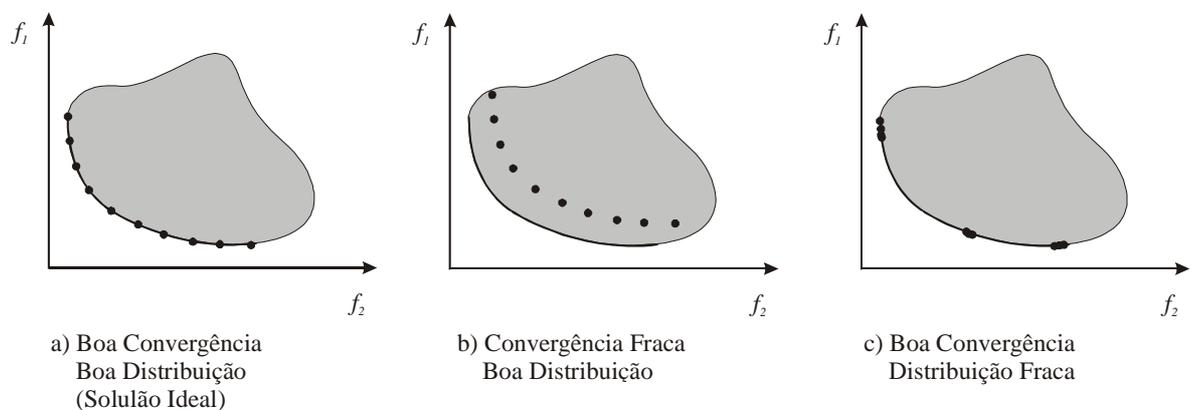


Figura 4.6 - Diferentes tipos de frentes que podem ser obtidas por métodos multiobjetivos

Como devem ser atendidos esses dois pressupostos de natureza distinta, e uma vez que não existe atualmente uma medida apenas para este fim, é recomendado empregarem-se, pelo menos duas métricas, ou medidas de performance, para verificar o desempenho dos métodos: (1) uma para verificar o quão próxima a solução encontrada está da solução ideal e (2) outra que verifique o grau de distribuição da solução ao longo da frente.

Uma dificuldade inicial enfrentada para se definir o primeiro tipo de métrica é que frente Pareto-Ótima é desconhecida. Com isso, a maioria das medidas empregadas para esse fim tende a comparar entre si as soluções obtidas pelos diferentes métodos. Outra forma de se verificar a qualidade da frente é através de uma medida de “volume” ocupado pelas soluções.

Existem várias métricas usadas para mensurar a qualidade da frente não dominada obtida (VELDHUIZEN e LAMONT, 1998). Contudo, neste trabalho, empregaram-se três métodos de medição, que são os mais utilizados para determinar

a performance dos métodos multiobjetivos, a saber: *Métrica C*, *Métrica S*, e *Métrica de Espaçamento (Spacing)*. Os detalhes de cada um desses processos serão explicados a seguir.

4.3.2.1 Métrica C

A frente não dominada é um dado desconhecido, sendo preciso recorrer-se a outros meios para se determinar o quão próximo o resultado obtido está da solução ideal. Quando se está comparando diferentes conjuntos de soluções, pode-se fazer uma avaliação desses conjuntos um com o outro de modo a definir o grau de dominância dos mesmos. Para isto emprega-se uma medida denominada *Métrica C*. Essa medida, que serve para indicar o grau de convergência para a frente Pareto, foi proposta por Zitzler (1998), sendo um dos índices mais empregados na comparação de metodologias de otimização multiobjetivo.

Sejam **A** e **B** dois vetores soluções distintos, a métrica $C(A,B)$ determina a proporção de soluções de **B** que são estritamente dominadas pelo vetor **A**, ou seja:

$$C(\mathbf{A}, \mathbf{B}) = \frac{|\{b \in \mathbf{B} \mid \exists a \in \mathbf{A} : a \prec b\}|}{|\mathbf{B}|} \quad (4.29)$$

onde $|\cdot|$ indica o número de elementos do conjunto.

O valor de $C(A,B)$ será 1 se todos os membros de B forem dominadas por A , e 0 se nenhum membro de A dominar B . Uma vez que o operador não é simétrico tem-se que, na maioria dos casos $C(B,A) \neq 1 - C(A,B)$, sendo necessário o cálculo de ambas as formas.

4.3.2.2 Métrica S

A métrica S foi definida por Zitzler (1999), sendo também chamada de *hipervolume* (DEB, 2001). Ela calcula o volume compreendido entre o vetor **A** e um ponto de referência arbitrado W_* . Matematicamente, para cada solução $a \in \mathbf{A}$, um hipercubo hc_a é construído com referência a W_* (Figura 4.7). A métrica S será igual à união de todos os hipercubos encontrados. Formalmente, a métrica S é definida da seguinte maneira (ZITZLER, 1999):

Seja $\mathbf{A} (A_1 A_2, A_3... A_n)$ o conjunto de soluções não dominadas, a função $V(A)$ será igual ao volume delimitado pelos vértices $(v_1, v_2, v_3... v_n)$ que são resultado da interseção de

hiperplanos que cortam A_i . Para cada eixo no espaço dos objetivos, e para cada solução A_i existe um hiperplano perpendicular ao eixo e que passa através das soluções A .

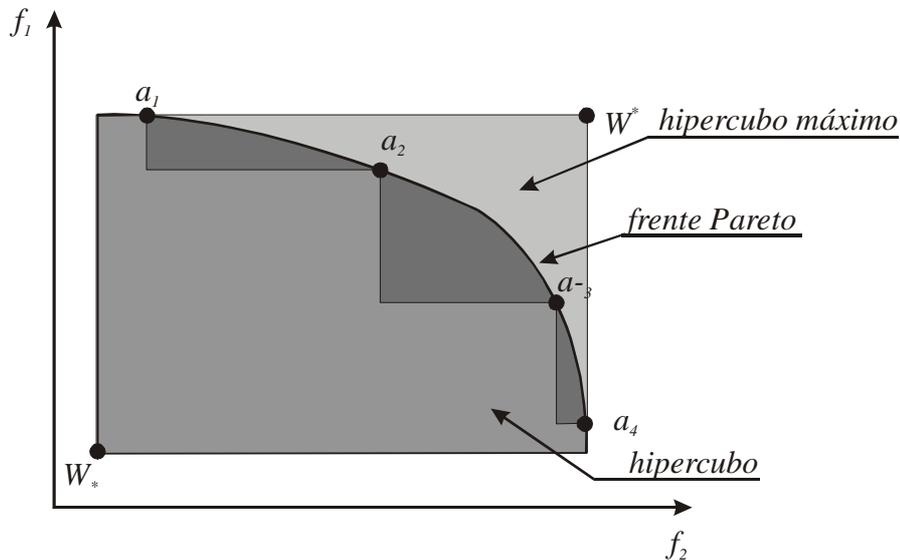


Figura 4.7 - Definição da Métrica S

Devido à diferença de ordem de grandeza entre os diferentes objetivos que se quer otimizar, empregou-se nesse trabalho o conceito de hiperplano relativo (VELDHUIZEN, 1999), em que cada dimensão é dividida por um valor máximo esperado para cada objetivo W^* (considerando o caso de maximização). Esse procedimento evita que um objetivo se sobressaia sobre outro.

As duas medidas apresentadas servem para aferir o grau de proximidade de um conjunto de soluções à frente Pareto. A métrica apresentada a seguir procura estimar o grau de distribuição da frente gerada.

4.3.2.3 Espaçamento

Schott (1995) empregou uma métrica que é calculada como sendo a distância relativa entre duas soluções consecutivas do conjunto de soluções não dominadas obtido, sendo expressa por:

$$SP_A = \sqrt{\frac{1}{|A|} \sum_{i=1}^{|A|} (sp_i - \overline{sp})^2} \quad (4.30)$$

em que sp_i é a menor distância da solução X_i , até a solução mais próxima; e \overline{sp} é a média dos valores de sp_i e.

Matematicamente, essa medida de qualidade da distribuição da frente não dominada é baseada no desvio padrão das diferentes soluções sp_i . Quanto mais próximas e uniformemente espaçadas as soluções estão uma das outras, menor será o valor do espaçamento (SP_A)

4.4 Modelo de Análise Hidráulica

A análise hidráulica de redes de abastecimento de água é um problema que envolve a resolução de um sistema de equações não-lineares. Apesar de ter havido um grande avanço no desenvolvimento de métodos para esse fim nas últimas décadas, metodologias clássicas como o do *seccionamento fictício* e até mesmo o de *Hardy-Cross* são usadas até hoje, sendo o seu uso regulado pelas normas vigentes. No entanto, tais formulações possuem limitações, seja do ponto de vista da eficiência numérica (Hardy-Cross), seja pelo excessivo grau de simplificação do problema (seccionamento fictício).

Os métodos mais recentes aplicados à análise hidráulica de uma rede hidráulica podem ser classificados de duas formas (NIELSEN, 1989). O primeiro grupo busca resolver o *sistema de equações* através de métodos como o de Newton-Raphson ou através de *linearizações sucessivas*. O segundo resolve o problema através de técnicas de *otimização* em que se procura minimizar uma função objetivo que relaciona o resíduo dos balanços de massa nos nós e das energias nos circuitos de modo que, ao final do processo, todos os nós estejam balanceados.

Por apresentarem um desenvolvimento do estado da arte maior, bem como estarem melhor documentados na literatura e, até o momento, possuírem maior eficiência computacional, adotou-se os métodos de solução do sistema não-linear como o modelo de análise hidráulica dessa pesquisa.

4.4.1 Equações Hidráulicas

Os problemas de análise hidráulica de uma rede determinam dois tipos de incógnitas que são: as cargas nos nós da rede (h_j) e as vazões nos seus diversos trechos (q_i). A escolha do conjunto de incógnitas que se irá trabalhar é a base do desenvolvimento e eficiência do simulador hidráulico.

Os modelos que têm as vazões como incógnita, procuram resolver o conjunto de equações de conservação de energia dentro de diversos circuitos, ditos naturais, da rede. Sousa (1994) mostrou que esse tipo de formulação apresenta convergência e estabilidade superior aos modelos baseados nos balanços de massas nos nós que têm

as cargas hidráulicas como incógnitas. No entanto, a formulação dos circuitos considera que as demandas do sistema são constantes, o que foge ao objetivo desse trabalho, pois a partir do momento que se trabalha com demandas dependentes da pressão e com vazamentos, as necessidades de água nos nós passam a ser também incógnitas do problema, sendo as mesmas funções das cargas hidráulicas. Assim, o modelo utilizado neste trabalho procura resolver um sistema de equações de conservação de massa nos nós e apresenta como incógnitas as cargas nos nós.

No desenvolvimento do modelo de análise hidráulica será considerada a seguinte convenção: para um trecho i que conecte dois nós $j_{i,1}$ e $j_{i,2}$, diz-se que a vazão é positiva quando a direção do fluxo é do nó $j_{i,2}$ para o nó $j_{i,1}$.

Seja uma rede qualquer composta por NN nós interiores, NR nós fontes (reservatórios ou tanques), e NT trechos que conectam os nós. A perda de carga entre dois nós, $i_{j,1}$ e $i_{j,2}$, será expressa por:

$$h_{j_{i,2}} - h_{j_{i,1}} = K_i q_i^\alpha \quad (4.31)$$

em que K_i é o coeficiente de resistência da tubulação no trecho i ; α é o expoente da fórmula de perda de carga.

A conservação de massa no sistema é expressa por:

$$F_j = \sum_{i=1}^{NT} a_{ij} q_i - Q_j = 0 \quad \forall \quad j = 1 \dots NN \quad (4.32)$$

sendo Q_j as demandas concentradas no nó j ; $a_{ij} = 1$ se vazão do trecho chega ao nó; $a_{ij} = -1$ se vazão do trecho sai do nó; $a_{ij} = 0$ caso os nós não sejam conectados pelo trecho.

Considerando a resolução em termos de carga nos nós tem-se a seguinte expressão:

$$F_j = \sum_{i=1}^{NT} a_{ij} \frac{(h_{j_{i,2}} - h_{j_{i,1}})^{1/\alpha}}{K_i^{1/\alpha}} - Q_j = 0 \quad \forall \quad j = 1 \dots NN \quad (4.33)$$

A matriz de incidência $\hat{\mathbf{A}}$ ($NT \times NN + NR$) formada pelos elementos a_{ij} pode ser dividida em duas submatrizes \mathbf{A} ($NT \times NN$) e \mathbf{A}_r ($NT \times NR$), a primeira corresponde aos nós interiores e a segunda aos nós fontes.

O sistema de equações resultante é não linear de ordem n . Para se solucionar esse sistema recorre-se a métodos matemáticos iterativos, como o método de Newton-

Raphson e suas variações, ou a linearização sucessiva do sistema, Método da Teoria Linear.

4.4.1.1 Método Newton-Raphson (MNR)

O método Newton-Raphson para a resolução de sistemas de equações não lineares pode ser escrito da seguinte forma (SHAMIR e HOWARD, 1968):

$$\mathbf{X}_{k+1} = \mathbf{X}_k + \Delta\mathbf{X}_k \quad (4.34)$$

onde:

$$\Delta\mathbf{X}_k = -\mathbf{J}_k^{-1}\mathbf{F}_k \quad (4.35)$$

em que:

\mathbf{J}_k é a matriz Jacobiana da função \mathbf{F}

$$\mathbf{J}_k = \left\{ \frac{\partial \mathbf{F}_i}{\partial \mathbf{X}_j} \right\} \quad (4.36)$$

e k é a iteração atual do processo.

Quando as cargas hidráulicas da rede são incógnitas, o sistema da Eq. (4.34) pode ser escrito como:

$$\mathbf{h}_{k+1} = \mathbf{h}_k + \Delta\mathbf{h}_k \quad (4.37)$$

A matriz Jacobiana desse sistema será:

$$\mathbf{J}_k = \mathbf{A}^T \mathbf{C}' \mathbf{A} \quad (4.38)$$

onde:

$$\mathbf{C}' = \text{diag} \left[\frac{1}{\alpha} \frac{|h_{j_{1,2}} - h_{j_{1,1}}|^{\frac{1}{\alpha}-1}}{K_1^{1/\alpha}}, \frac{1}{\alpha} \frac{|h_{j_{2,2}} - h_{j_{2,1}}|^{\frac{1}{\alpha}-1}}{K_2^{1/\alpha}}, \dots, \frac{1}{\alpha} \frac{|h_{j_{NT,2}} - h_{j_{NT,1}}|^{\frac{1}{\alpha}-1}}{K_{NT}^{1/\alpha}} \right]. \quad (4.39)$$

Fazendo

$$\mathbf{C} = \alpha \mathbf{C}', \quad (4.40)$$

tem-se:

$$\mathbf{J}_k = \frac{1}{\alpha} \mathbf{A}^T \mathbf{C} \mathbf{A} \quad (4.41)$$

O vetor \mathbf{F}_k será expresso matricialmente por (NIELSEN, 1989):

$$\mathbf{F}_k = [\mathbf{Q} + \mathbf{A}^T \mathbf{C} (\mathbf{A} \mathbf{h}_k + \mathbf{A}_r \mathbf{h}_r)] \quad (4.42)$$

sendo \mathbf{h}_r o vetor com as alturas d'água dos reservatórios.

Com isso a equação matricial (4.37) será:

$$\mathbf{h}_{k+1} = \mathbf{h}_k - \alpha [\mathbf{A}^T \mathbf{C} \mathbf{A}]^{-1} [\mathbf{Q} + \mathbf{A}^T \mathbf{C} (\mathbf{A} \mathbf{h}_k + \mathbf{A}_r \mathbf{h}_r)] \quad (4.43)$$

4.4.1.2 Método da Teoria Linear (MTL)

O método da Teoria Linear (MTL) foi proposto inicialmente por Wood e Charles (1972) sendo modificado posteriormente por Isaacs e Mills (1980) de modo a resolver o sistema na formulação dos nós. Este método lineariza a Eq. (4.27) resolvendo o problema sucessivamente até que a solução encontrada atenda a uma precisão pré-determinada.

No MTL, o problema é linearizado da seguinte forma:

$$h_{j_i,2k} - h_{j_i,1k} = K_i q_{i_k} q_{i_{k-1}}^{\alpha-1} \quad (4.44)$$

onde $q_{j_{k-1}}$ é a vazão no trecho i durante a iteração anterior.

O sistema de equações da conservação de massa será expresso por:

$$F_j = \sum_{i=1}^{NT} a_{ij} Y_{i_k} (h_{j_i,2k} - h_{j_i,1k}) - Q_i = 0 \quad \forall \quad j = 1 \dots NN \quad (4.45)$$

em que:

$$Y_{i_k} = \frac{1}{K_i^\alpha (h_{j_i,2k-1} - h_{j_i,1k-1})^{\frac{1}{\alpha}}} = \frac{(h_{j_i,2k-1} - h_{j_i,1k-1})^{\frac{1}{\alpha}-1}}{K_i^\alpha} = C_i \quad (4.46)$$

Nielsen (1989) resolveu o sistema resultante aplicando às equações resultantes um método de gradiente, semelhante ao MNR. A matriz Jacobiana desse sistema será:

$$\mathbf{J}_k = \mathbf{A}^T \mathbf{C} \mathbf{A} \quad (4.47)$$

Dessa forma, o novo valor da carga hidráulica no nó será dado por:

$$\mathbf{h}_{k+1} = \mathbf{h}_k - [\mathbf{A}^T \mathbf{C} \mathbf{A}]^{-1} [\mathbf{Q} + \mathbf{A}^T \mathbf{C} (\mathbf{A} \mathbf{h}_k + \mathbf{A}_r \mathbf{h}_r)] \quad (4.48)$$

4.4.1.3 Método Híbrido de Nielsen

Os métodos Newton-Raphson e da Teoria Linear apresentam vantagens quando para se trabalhar com determinados tipos de problemas, bem como desvantagens, principalmente quando as situações para os quais foram desenvolvidos não são verificadas. De um modo geral, o MNR converge mais rápido

(quadraticamente) quando comparado com o MTL, porém o mesmo necessita de bons valores iniciais para que isto ocorra. Caso a aproximação inicial não esteja nas proximidades da solução final, o MNR pode consumir mais iterações para convergir, podendo até não fazê-lo (SOUZA et al., 2000, FORMIGA ET. AL 2003). Essa dificuldade é contornada implementando-se sub-rotinas para a determinação de melhores valores da solução inicial.

O MTL apresenta uma taxa de convergência inicial melhor do que o MNR, não precisando de valores iniciais tão bons. No entanto, o MTL tende a oscilar em torno da solução final, apresentando dificuldades de convergência para sistemas complexos (HANSEN MADSEN E NIELSEN, 1990).

O método proposto por Nielsen (1989), doravante chamado de *híbrido*, faz inicialmente algumas *Iterações Iniciais (II)*, com o método TL, obtendo-se uma melhor aproximação das vazões e cargas hidráulicas nos nós. Essa aproximação é a solução inicial do método NR, que, a partir do valor encontrado, tende a convergir em um número menor de passos. Com isso, o método TL serviria como uma rotina para determinação dos valores de partida para o método de Newton-Raphson propriamente dito.

Como as formulações dos métodos MTL e MNR são semelhantes, a implementação do método Híbrido ocorre de maneira simples, como mostrado a seguir:

$$\mathbf{h}_{k+1} = \mathbf{h}_k - \gamma [\mathbf{A}^T \mathbf{C} \mathbf{A}]^{-1} [\mathbf{Q} + \mathbf{A}^T \mathbf{C} (\mathbf{A} \mathbf{h}_k + \mathbf{A}_r \mathbf{h}_r)] \quad (4.49)$$

em que $\gamma = 1$ quando $NI^{*2} \leq II$ e $\gamma = \alpha$ quando $NI > II$.

4.4.1.4 Método do Gradiente

As equações de conservação de energia podem ser escritas matricialmente da seguinte forma (TODINI e PILATI, 1987):

$$\mathbf{C} \mathbf{q} + \mathbf{A} \mathbf{h} = -\mathbf{A}_r \mathbf{h}_r \quad (4.50)$$

enquanto que a conservação de massa é expressa por:

$$\mathbf{A}^T \mathbf{q} = \mathbf{Q} \quad (4.51)$$

O sistema de equações resultante é dado por:

* Número de Iterações

$$\begin{bmatrix} \mathbf{C} & \mathbf{A} \\ \mathbf{A}^T & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{q} \\ \mathbf{h} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\mathbf{A}_r \mathbf{h}_r \\ \mathbf{Q} \end{bmatrix} \quad (4.52)$$

O sistema 4.47 é não linear, podendo ser resolvido através do esquema Newton-Raphson, para isso, é necessário efetuar uma diferenciação do sistema com relação à \mathbf{q} e \mathbf{h} , que resulta em:

$$\begin{bmatrix} \alpha \mathbf{C} & \mathbf{A} \\ \mathbf{A}^T & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\mathbf{q} \\ d\mathbf{h} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d\mathbf{E} \\ d\mathbf{Q} \end{bmatrix} \quad (4.53)$$

sendo:

$$d\mathbf{q} = \mathbf{q}_k - \mathbf{q}_{k+1} \quad (4.54)$$

$$d\mathbf{h} = \mathbf{h}_k - \mathbf{h}_{k+1} \quad (4.55)$$

$d\mathbf{E}$ e $d\mathbf{Q}$ são os resíduos obtidos em cada iteração k expressos por:

$$d\mathbf{E} = \mathbf{C}\mathbf{q}_k + \mathbf{A}\mathbf{h}_k + \mathbf{A}_r \mathbf{h}_r \quad (4.56)$$

$$d\mathbf{Q} = \mathbf{A}^T \mathbf{q}_k - \mathbf{Q} \quad (4.57)$$

Efetuando-se o produto do sistema 4.48 obtém-se:

$$\alpha \mathbf{C}(\mathbf{q}_k - \mathbf{q}_{k+1}) + \mathbf{A}(\mathbf{h}_k - \mathbf{h}_{k+1}) = \mathbf{C}\mathbf{q}_k + \mathbf{A}\mathbf{h}_k + \mathbf{A}_r \mathbf{h}_r \quad (4.58)$$

$$\mathbf{A}^T(\mathbf{q}_k - \mathbf{q}_{k+1}) = \mathbf{A}^T \mathbf{q}_k - \mathbf{Q} \quad (4.59)$$

Após alguns procedimentos algébricos na expressão (4.58), encontra-se a seguinte equação:

$$\mathbf{q}_{k+1} = (1 - \alpha^{-1})\mathbf{q}_k - \alpha^{-1}\mathbf{C}^{-1}[\mathbf{A}_r \mathbf{h}_r + \mathbf{A}\mathbf{h}_{k+1}] \quad (4.60)$$

substituindo (4.54) em (4.53) tem-se:

$$\mathbf{A}^T(\mathbf{q}_k - (1 - \alpha^{-1})\mathbf{q}_k + \alpha^{-1}\mathbf{C}^{-1}[\mathbf{A}_r \mathbf{h}_r + \mathbf{A}\mathbf{h}_{k+1}]) = \mathbf{A}^T \mathbf{q}_k - \mathbf{Q} \quad (4.61)$$

que simplificando resulta em:

$$\mathbf{h}_{k+1} = -(\mathbf{A}^T \alpha^{-1} \mathbf{C}^{-1} \mathbf{A})^{-1} [\alpha^{-1} \mathbf{A}^T (\mathbf{q}_k + \mathbf{C}^{-1} \mathbf{A}_r \mathbf{h}_r) + (\mathbf{Q} - \mathbf{A}^T \mathbf{q}_k)] \quad (4.62)$$

4.4.1.5 Vazamentos e Demanda Variável com a Pressão

A inclusão dos eventuais vazamentos na rede e da utilização da demanda como uma variável dependente da pressão nos nós fará com que o vetor demanda (\mathbf{Q}) seja função também da altura hidráulica (\mathbf{h}). É necessário assim, reformular o sistema de equações para atender a essa nova situação, visto que a demanda será a soma das perdas por vazamentos nos trechos adjacentes ao nó, e das demandas nodais, que

neste caso serão dependentes da carga no nó. As formulações de vazamentos e demanda dirigida pela pressão são apresentadas nas Eq. (4.2) e (4.20). As modificações no método de análise hidráulica são apresentadas a seguir.

4.4.1.6 Modificação dos Métodos de Resolução

Método Híbrido

A adoção da vazão como sendo dependente da carga no nó torna necessário introduzir uma mudança na formulação original dos métodos para a análise hidráulica da rede. Essa mudança ocorrerá na definição da matriz Jacobiana. A equação para a determinação dessa matriz será:

$$\mathbf{J}_k = \mathbf{A}^T \mathbf{C} \mathbf{A} + \mathbf{C}_{\text{Vaz}} + \mathbf{C}_{\text{Dem}} \quad (4.63)$$

onde \mathbf{C}_{Vaz} será:

$$\mathbf{C}_{\text{Vaz}} = \text{diag} \left[\theta_1 \varphi_1 (h_1 - z_1)^{\theta_1 - 1}, \theta_2 \varphi_2 (h_2 - z_2)^{\theta_2 - 1}, \dots, \theta_{NN} \varphi_{NN} (h_{NN} - z_{NN})^{\theta_{NN} - 1} \right] \quad (4.64)$$

Esta expressão representa a derivada de 1ª ordem do termo de vazamento com relação à carga hidráulica h_j da Eq. (2.64).

A matriz \mathbf{C}_{Dem} , que representa a derivada da equação de demanda dependente da pressão (Eq. 2.25), é expressa por:

$$\mathbf{C}^{\text{D}} = \text{diag} [c_1, c_2, \dots, c_n] \quad (4.56)$$

em que:

$$c_j = \frac{1}{\beta_j} Q_j^{\text{req}} \left(\frac{h_j - h_j^{\text{min}}}{h_j^{\text{des}} - h_j^{\text{min}}} \right)^{\frac{1}{\beta_j} - 1} \quad \text{se} \quad h_j^{\text{min}} \leq h_j \leq h_j^{\text{des}} \quad (4.57)$$

$$c_j = 0 \quad \text{se} \quad h_j^{\text{min}} > h_j > h_j^{\text{des}}$$

Método Gradiente

Salgado, Todini, e O'Connell (1993) propuseram uma modificação no método gradiente de modo a considerar um componente da demanda como sendo uma função da carga hidráulica no nó.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{C} & \mathbf{A} \\ \mathbf{A}^T & \mathbf{Q}^t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{q} \\ \mathbf{h} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\mathbf{A}_r \mathbf{h}_r \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (4.65)$$

sendo:

$$\mathbf{Q}_t = \text{diag} \left[\begin{array}{c} \varphi_1 (h_1 - z_1)^{\theta_1 - 1} + Q_1 (h_1) h_1^{-1}, \varphi_2 (h_2 - z_2)^{\theta_2 - 1} + Q_2 (h_2) h_2^{-1}, \dots, \\ \varphi_{NN} (h_{NN} - z_{NN})^{\theta_{NN} - 1} + Q_{NN} (h_{NN}) h_{NN}^{-1} \end{array} \right] \quad (4.66)$$

Desenvolvendo de modo semelhante ao feito no método gradiente, obtêm-se as seguintes expressões:

$$\mathbf{q}_{k+1} = (1 - \alpha^{-1}) \mathbf{q}_k - \alpha^{-1} \mathbf{C}^{-1} [\mathbf{A}_r \mathbf{h}_r + \mathbf{A} \mathbf{h}_{k+1}] \quad (4.67)$$

$$\mathbf{h}_{k+1} = -(\mathbf{A}^T \alpha^{-1} \mathbf{C}^{-1} \mathbf{A} - \mathbf{R})^{-1} [\alpha^{-1} \mathbf{A}^T (\mathbf{q}_k + \mathbf{C}^{-1} \mathbf{A}_r \mathbf{h}_r) + (\mathbf{C} \mathbf{h}_r + \mathbf{R} \mathbf{h}_r - \mathbf{A}^T \mathbf{q}_k)] \quad (4.68)$$

em que:

$$\mathbf{R} = [\mathbf{C}_{\text{Vaz}} + \mathbf{C}_{\text{Dem}}] \quad (4.69)$$

4.4.2 Componentes Hidráulicos

O modelo definido acima pode simular redes de abastecimento simples, compostas apenas por tubos e reservatórios, para incorporar outros componentes, é necessária a introdução de pequenos ajustes ao modelo.

Os componentes hidráulicos são regidos por leis específicas, geralmente expressas através de algum tipo de equação característica, podendo em muitos casos ser não-linear e com derivadas descontínuas. Existe, portanto, uma dificuldade de se garantir a convergência do método iterativo quando essas equações não possuem derivadas contínuas de primeira ordem (SOUZA, 1994). Os componentes empregados neste trabalho serão as válvulas

Existem vários tipos de válvulas que podem estar presentes em sistemas de abastecimento de água como por exemplo: válvulas de retenção, válvulas redutora de pressão, válvulas sustentadoras de pressão, válvulas de controle de fluxo, etc. Porém, neste trabalho, serão abordados os dois tipos mais comumente empregados no Brasil que são: válvulas de retenção (VR) e válvulas redutora de pressão (VRP).

4.4.2.1 Válvula de Retenção

As válvulas de retenção (VR) têm por finalidade fazer com que a água flua em apenas uma direção, fechando-se quando o sentido muda. Seja um trecho i , com resistência igual a K_i , que possui uma válvula de retenção instalada. Esse dispositivo hidráulico pode operar de duas diferentes formas:

- *Totalmente Fechada* - se a altura piezométrica de jusante ($h_{j_{i,2}}$) for maior que a de montante ($h_{j_{i,1}}$), a válvula será ativada, assim:

$$K_i = +\infty \quad q_i = 0$$

- *Totalmente Aberta* - a VR estará inativa se a carga hidráulica de montante ($h_{j_{i,1}}$) for maior ou igual que a de jusante. Dessa forma o valor da resistência do trecho permanece inalterado, uma vez que as perdas de carga localizadas não estão sendo consideradas.

4.4.2.2 Válvula de Redutora de Pressão

As válvulas redutoras de pressão (VRP) servem para limitar a pressão à jusante, mantendo-a abaixo de valores que podem causar danos à rede. Esses dispositivos são utilizados em locais com topografia acidentada ou com declividade acentuada. A VRP pode estar operando em três diferentes estados:

- *Totalmente Aberta* (inativa) - a válvula estará inativa (Figura 4.8) quando a carga a montante da válvula (h_{valv}) for inferior a uma carga hidráulica de serviço (h_{red}). Nesta situação as condições do sistema permanecem inalteradas.

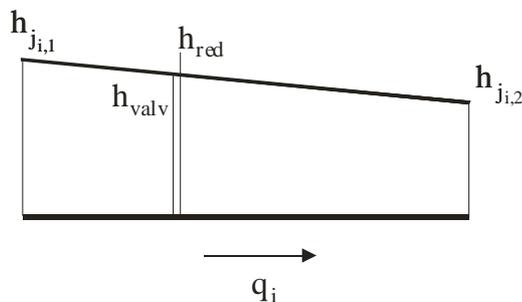


Figura 4.8 - Esquema de uma válvula redutora de pressão inativa

- *Totalmente Fechada* - a VRP se comportará como se fosse uma VR atuando uma resistência infinita (Figura 4.9), ou seja, a vazão que passa pelo trecho será nula.

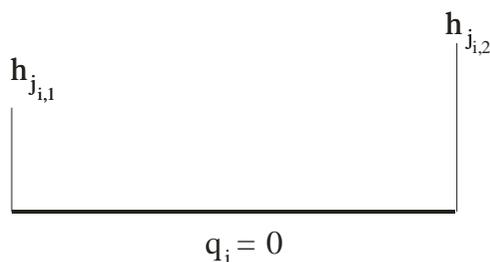


Figura 4.9. Esquema de uma válvula redutora de pressão fechada

- *Parcialmente Aberta* (ativa) - essa situação (Figura 4.10) ocorre quando a carga à montante da VRP (h_{valv}) é maior que a de serviço (h_{red}). Neste caso, a válvula se fechará, aumentando a resistência ao fluxo de modo a reduzir a pressão à jusante. O processo de cálculo da resistência é mostrado a seguir.

O passo inicial do processo é determinar a carga hidráulica a montante da válvula (h_{valv}), ou:

$$h_{valv} = h_{j_{i,1}} - (h_{j_{i,1}} - h_{j_{i,2}}) \frac{l_j'}{L_j} \quad (4.70)$$

em que l_j' é o comprimento do nó de montante até a válvula e L_j é o comprimento total do trecho. O valor da resistência adicional imposta pela válvula ao sistema é expresso por:

$$K_i^{valv} = \frac{h_{valv} - h_{red}}{q_i^\alpha} \quad (4.71)$$

A resistência no trecho será então:

$$K_i' = K_i + K_i^{valv} \quad (4.72)$$

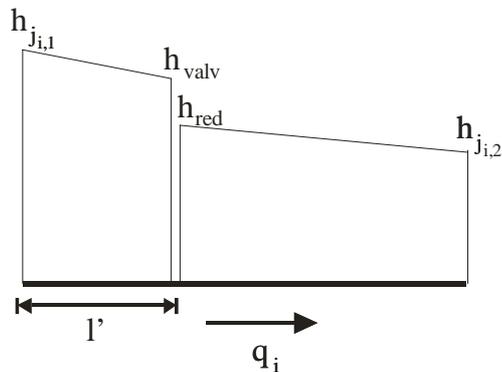


Figura 4.10. Esquema de uma válvula redutora de pressão ativa

A principal vantagem dessa formulação é que, além da facilidade de implementação, apresenta a capacidade de deixar a matriz Jacobiana sempre simétrica e diagonalmente dominante, com a diagonal principal sempre positiva (Souza, 1994). Esta propriedade é importante para uma resolução mais eficiente do sistema de equações resultante.

Outra vantagem apresentada por esta formulação é a possibilidade de alocação de uma válvula em qualquer trecho da rede, sem que seja necessária a modificação da topologia da mesma, ou seja, a inclusão de novos nós.

4.4.3 Resolução dos Sistemas de Equações

Uma importante parte do processo de análise de hidráulica é a definição da metodologia utilizada para resolver o sistema de equações resultante. A escolha correta do método de resolução do sistema de equações linear resultante implicará no bom desempenho computacional do modelo de análise hidráulica, tornando-o mais rápido, qualidade essencial para essas ferramentas.

O processo de solução do sistema de equações é dividido em duas etapas, na primeira, é efetuada uma reordenação da matriz de incidência. Na outra, a resolução propriamente dita do sistema por um dos diversos métodos disponíveis.

Devido à natureza da matriz de incidência, no caso o Jacobiano, optou-se por trabalhar com métodos que explorem o alto grau de esparsidade presentes nessas estruturas matriciais, já que estes são muito mais eficientes, principalmente para redes de médio e grande porte.

4.4.3.1 Reordenação

O algoritmo utilizado para se fazer a reordenação da matriz de incidência foi método de *Ordenação de Mínimo Grau* para matrizes simétricas. O grau de um nó em um grafo é o número de conexão que este possui. Ou no caso matricial, o número de elementos não zero fora da diagonal que localizados em uma determinada linha. O algoritmo de Ordenação de Mínimo Grau gera uma ordenação baseada em como esses graus são alterados durante o processo de eliminação de Gauss ou durante a fatorização de Cholesky. Durante esses processos, o número de elementos não zeros da matriz esparsa pode aumentar muito. Assim, a utilização desse algoritmo de ordenação irá diminuir a quantidade de elementos não zeros gerados.

A ordenação só é feita uma vez durante o processo, uma vez que não há mudança na matriz de incidência em todo o processo de otimização.

4.4.3.2 Método de Resolução dos Sistemas de Equações

A escolha do método de resolução do sistema de equações é importante para a performance do modelo hidráulico. Não existe um método superior aos outros para todas as situações, já que estes possuem "nichos" específicos, sendo mais eficientes

quando aplicados para determinados tamanhos e tipos de sistemas, e não tão bons para outros.

Os métodos empregados para resolver sistemas de equações lineares podem ser classificados em *diretos* e *iterativos*. Nos métodos diretos, a solução exata (excetuando-se erros de arredondamento), é obtida após a realização de um número finito de passos. Tais métodos conduzem a soluções finais precisas sendo geralmente aplicados a matrizes “cheias” ou *não esparsas*.

Os principais métodos diretos são: Eliminação Gaussiana, Fatorização LU e Fatorização de Cholesky. O primeiro pode ser aplicado a todo tipo de sistema de equações enquanto que o segundo exige que a matriz dos coeficientes seja simétrica e definida positiva.

Os métodos iterativos usam sucessivas aproximações para encontrar a solução do sistema de equações, com um nível de precisão previamente determinado. Esses métodos são mais eficientes para sistemas com elevado grau de esparsidade (>99%) não sendo recomendados para matrizes “cheias” (QUARTERONNI SACCO e SALERI, 2000).

São exemplos de métodos iterativos: Jacobi, Gauss-Seidel, Gradiente Conjugado, Gradiente Conjugado Pré-condicionado, Gradiente Conjugado Quadrado, Resíduo Mínimo, Resíduo Mínimo Generalizado, Quasi-Resíduo Mínimo, Gradiente BiConjugado e Gradiente BiConjugado Estabilizado e LQ Simétrico, entre outros.

A matriz dos coeficientes presente nos métodos de análise hidráulica podem ser classificadas como sendo uma *Matriz de Stieltjes*, que possui as seguintes características: *esparsa, simétrica, diagonalmente dominante e definida positiva*.

Embora exista uma grande quantidade de métodos para se resolver esse tipo de matriz, os mais eficientes são aqueles específicos para matrizes de Stieltjes, como o método de Cholesky e o Gradiente Conjugado e suas modificações. Embora esses métodos sejam restritos para a resolução de sistemas de equações com matrizes definidas positivas, eles são os mais eficientes para a resolução de sistemas baseados nesse tipo sistemas.

4.4.3.2.1 Fatorização de Cholesky

A forma universal para se resolver um sistema de equações lineares é a eliminação de Gauss. No entanto para matrizes simétricas, definidas positiva e esparsas o método direto mais eficiente é a Fatorização, ou Decomposição de

Cholesky. Neste método, a matriz \mathbf{A} produz uma matriz triangular superior \mathbf{L} de modo que:

$$\mathbf{A} = \mathbf{L}^T \mathbf{L} \quad (4.73)$$

O cálculo dos elementos da matriz \mathbf{L} é feito segundo as equações abaixo:

$$l_{ii} = \left[a_{ii} - \sum_{k=1}^{i-1} l_{ik}^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.74)$$

$$l_{ji} = \frac{\left[a_{ji} - \sum_{k=1}^{i-1} l_{jk} l_{ik} \right]}{l_{ii}} \quad \forall \quad j = (i+1), (i+2), \dots, mn \quad (4.75)$$

O sistema original pode ser escrito da seguinte forma:

$$\mathbf{L}^T \mathbf{y} = \mathbf{b} \quad (4.76)$$

$$\mathbf{L} \mathbf{x} = \mathbf{y} \quad (4.77)$$

4.4.3.2.2 Método do Gradiente Conjugado

Quando se está trabalhando com matrizes com alto grau de esparsidade, os métodos iterativos mostram-se mais vantajosos que os diretos, pois evitam o efeito de preenchimento (*fill-in* em inglês) da matriz, o que não é desejado. Infelizmente, apenas um pequeno número de elementos da diagonal principal é estritamente dominante, ou seja, o elemento da diagonal principal é maior que a soma dos outros elementos da respectiva linha. Isto implica em uma baixa taxa de convergência para métodos estacionários como Jacobi e Gauss-Seidel, uma vez que o número de iterações para convergência desses métodos tende a aumentar exponencialmente com o tamanho da matriz (CUNHA, 2000).

Um método alternativo que converge com um número limitado de iterações, não sendo tão influenciado pelo condicionamento da matriz, é o método do Gradiente Conjugado (GC), proposto por Hestenes e Stiefel (1952), e suas modificações.

O método do Gradiente Conjugado (GC) é o mais antigo e conhecido dos métodos chamados não-estacionários (BARRET, BARRY E CHAN, 1994). A solução de um sistema de equações lineares é equivalente à minimização de \mathbf{x} na função quadrática:

$$J(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} \mathbf{x}^T \mathbf{A} \mathbf{x} - \mathbf{b}^T \mathbf{x} \quad (4.78)$$

O método GC consiste essencialmente em duas partes: definição da “direção de descida” (\mathbf{p}_k) e escolha do ponto de mínimo local nessa direção (\mathbf{x}_k). O sistema de equações pode ser resolvido recursivamente pelo seguinte algoritmo:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{r}_0 &= \mathbf{b} - \mathbf{A} \mathbf{x}_0 \\ \mathbf{p}_0 &= \mathbf{r}_0 \end{aligned} \right\} k = 0$$

$$\left. \begin{aligned} \alpha_k &= -\frac{\mathbf{p}_k^T \mathbf{r}_k}{\mathbf{p}_k^T \mathbf{A} \mathbf{p}_k} \\ \mathbf{x}_{k+1} &= \mathbf{x}_k + \alpha_k \mathbf{p}_k \\ \mathbf{r}_{k+1} &= \mathbf{r}_k - \alpha_k \mathbf{A} \mathbf{p}_k \\ \beta_k &= \frac{(\mathbf{A} \mathbf{p}_k)^T \mathbf{r}_{k+1}}{(\mathbf{A} \mathbf{p}_k)^T \mathbf{p}_k} \\ \mathbf{p}_{k+1} &= \mathbf{r}_{k+1} - \beta_k \mathbf{p}_k \end{aligned} \right\} k > 0 \quad (4.79)$$

No método GC, a solução do sistema é encontrada em no máximo n iterações com um pequeno número de operações requerido em cada passo, devido à baixa densidade de \mathbf{A} . Porém, em decorrência dos erros de truncamento, o número de passos requerido pode ser maior (TODINI e PILATI, 1987).

Para sistemas com Número de Condição³, $K(\mathbf{A})$, maior que 10^4 , o método GC apresenta uma taxa de convergência lenta (KERSHAW, 1978). Esse fenômeno é resultado da ampliação dos erros de arredondamento que caracterizam as matrizes mal condicionadas. O mal-condicionamento ocorre quando seus autovalores se distribuem num intervalo muito grande, ou quando a matriz apresenta um autovalor próximo à zero.

4.4.3.2.3 Pré-Condicionamento

³ O número de condicionamento de uma matriz ($K(\mathbf{A})$) é uma medida de sensibilidade da solução do sistema de equações à propagação dos erros de arredondamento. O valor de $K(\mathbf{A})$ é dado pela seguinte equação:

$$K(\mathbf{A}) = \frac{\|\mathbf{A}\|}{\|\mathbf{A}^{-1}\|}$$

onde $\|\cdot\|$ é o operador norma da matriz. Quanto maior for o valor de $K(\mathbf{A})$ pior é o seu condicionamento.

A taxa de convergência dos métodos iterativos depende de propriedades como o raio espectral (relação entre o maior e menor autovalor) da matriz dos coeficientes. No caso de matrizes mal condicionadas, com raio espectral grande, pode-se tentar trabalhar com um sistema de equações equivalentes, que produz a mesma solução, mas que tenha um menor valor de $K(\mathbf{A})$. Para se efetuar essa transformação, recorre-se aos chamados *Pré-Condicionadores de Matrizes* (BARRET, BARRY E CHAN, 1994).

O sistema de equações lineares

$$\mathbf{Ax} = \mathbf{b} \quad (4.80)$$

pode ser substituído por:

$$\mathbf{P}^{-1}\mathbf{Ax} = \mathbf{P}^{-1}\mathbf{b} \quad (4.81)$$

sendo \mathbf{P}^{-1} a matriz pré-condicionadora de \mathbf{A} . O sistema apresenta a mesma solução, porém a matriz $\mathbf{P}^{-1}\mathbf{A}$ pode ter um condicionamento melhor do que \mathbf{A} .

Uma vez que esse artifício altera o raio espectral da matriz dos coeficientes, seria interessante escolher, para um dado sistema de equações, um pré-condicionador ótimo, ou seja, uma matriz que diminua ao máximo o número de iterações requerido para convergência. O pré-condicionador ideal seria $\mathbf{P} = \mathbf{A}^{-1}$, entretanto, o processo para se determinar a inversa da matriz \mathbf{A} não é computacionalmente eficiente.

Embora exista uma vasta atividade de pesquisa no pré-condicionamento de sistemas lineares, não há, até o momento, uma metodologia geral para se encontrar pré-condicionadores eficientes. Recomendações, no entanto, podem ser feitas para alguns casos particulares, entre eles as matrizes de Stieltjes, que serão abordadas a seguir (CUNHA, 2000).

Os pré-condicionadores podem ser divididos em duas categorias: *algébricos* e *funcionais*. Os pré-condicionadores algébricos são independentes do problema que originou o sistema a ser resolvido, e construídos via procedimentos algébricos. Podem-se citar alguns como: pré-condicionadores diagonais, fatorização LU incompleta, fatorização Cholesky incompleta e pré-condicionadores polinomiais. Os funcionais são construídos especificamente para o sistema que se quer resolver, sendo então dependentes destes. Exemplos de pré-condicionadores funcionais são os métodos SOR - Relaxação Sucessiva - e SSOR - Relaxação Sucessiva Simétrica (BARRET, BARRY E CHAN, 1994).

Neste trabalho foram utilizados os dois tipos de pré-condicionadores algébricos, mais frequentemente empregados para matrizes de Stieltjes, a saber: Pré-Condicionadores Diagonais e Fatorização Cholesky Incompleta.

Pré-Condicionadores Diagonais

A escolha de \mathbf{P} como sendo a diagonal principal é geralmente um meio efetivo em melhorar as propriedades espectrais da matriz \mathbf{A} , principalmente se esta for simétrica definida positiva

Fatorização Cholesky Incompleta

Uma das desvantagens da fatorização Cholesky é o preenchimento de parte da matriz \mathbf{A} , como ilustrado na Figura 4.11. Esse preenchimento aumenta consideravelmente o tempo de resolução do sistema para sistemas de grande porte.

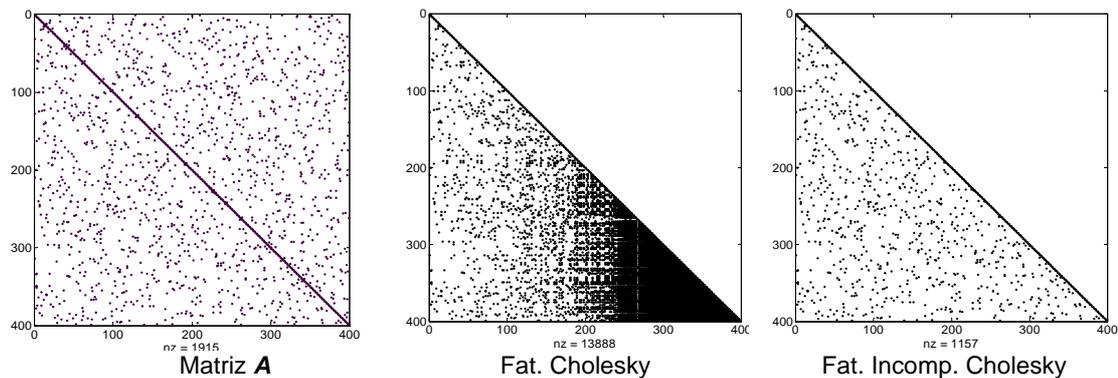


Figura 4.11 - Visualização do preenchimento de uma matriz A de Stieltjes com dimensões 400×400 , da matriz L^T obtida através da Fatorização de Cholesky e da matriz L^T obtida pela Fatorização Incompleta de Cholesky com a indicação do número de elementos não zero (nz) da matriz.

Para contornar esse problema foi proposto efetuar uma decomposição incompleta, em que fosse possível estabelecer um nível de preenchimento desejado da matriz \mathbf{L} . Foram então desenvolvidos diversos procedimentos que podem ser empregados para se efetuar essa fatorização. Para o caso de matrizes de Stieltjes, o mais aconselhado é o método *no-fill*, proposto por Kershaw (1978), sendo recomendado para matrizes com Número de Condição superior a 10^4 .

No método *no-fill*, a matriz \mathbf{M} terá o mesmo esquema de preenchimento, e conseqüentemente o mesmo grau de esparsidade, da matriz triangular inferior de \mathbf{A} (Figura 4.11). A decomposição da matriz \mathbf{A} será feita de modo que:

$$\mathbf{A} = \mathbf{M} \mathbf{M}^T + \mathbf{E} \quad (4.82)$$

sendo \mathbf{E} a matriz do erro resultante.

O método utilizado para obtenção da matriz \mathbf{M} é quase idêntico ao utilizado na fatorização completa. A diferença básica é que o cálculo da matriz é realizado apenas para os elementos de \mathbf{A} diferentes de zero. Assim a matriz \mathbf{M} será obtida mediante o seguinte equacionamento:

$$m_{ji} = \frac{\left[a_{ji} - \sum_{k=1}^{i-1} l_{jk} m_{ik} \right]}{l_{ji}} \quad \text{se } a_{ji} \neq 0 \quad (4.83)$$

$$m_{ji} = 0 \quad \text{se } a_{ji} = 0$$

A equação 4.83 é um procedimento de pré-condicionamento à esquerda. O condicionamento utilizado quando se está trabalhando com matrizes resultantes de fatorização incompleta é chamado central e é fornecido por:

$$\mathbf{M}^{-1} \mathbf{A} (\mathbf{M}^T)^{-1} \mathbf{M}^T \mathbf{x} = \mathbf{M}^{-1} \mathbf{y} \quad (4.84)$$

Usando a matriz \mathbf{M} como pré-condicionadora de \mathbf{A} , o método dos gradientes conjugados será dado por:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{r}_o &= \mathbf{b} - \mathbf{A} \mathbf{x}_o \\ \mathbf{z}_o &= (\mathbf{L} \mathbf{L}^T)^{-1} \mathbf{r}_o \\ \mathbf{p}_o &= \mathbf{z}_o \end{aligned} \right\} k = 0$$

$$\left. \begin{aligned} \alpha_k &= -\frac{\mathbf{p}_k^T \mathbf{r}_k}{\mathbf{p}_k^T \mathbf{A} \mathbf{p}_k} \\ \mathbf{x}_{k+1} &= \mathbf{x}_k + \alpha_k \mathbf{p}_k \\ \mathbf{r}_{k+1} &= \mathbf{r}_k - \alpha_k \mathbf{A} \mathbf{p}_k \\ \mathbf{z}_{k+1} &= (\mathbf{L} \mathbf{L}^T)^{-1} \mathbf{r}_{k+1} \\ \beta_k &= \frac{(\mathbf{A} \mathbf{p}_k)^T \mathbf{z}_{k+1}}{(\mathbf{A} \mathbf{p}_k)^T \mathbf{p}_k} \\ \mathbf{p}_{k+1} &= \mathbf{z}_{k+1} - \beta_k \mathbf{p}_k \end{aligned} \right\} k > 0 \quad (4.85)$$

4.5 Seleção das Alternativas

O último passo na metodologia de dimensionamento proposta neste trabalho se refere à hierarquização das alternativas geradas segundo o grau de satisfação do decisor. Diferente da geração de alternativas que é regida por princípios matemáticos, o processo de seleção é baseado, principalmente, no

juízo de valores, que muitas vezes são de difícil quantificação. Assim, a escolha final de qual alternativa será adotada requer que o tomador de decisão avalie cuidadosamente os pesos a serem dados para cada objetivo, bem como os critérios de preferência e veto, que constam dos métodos de seleção.

A escolha da alternativa que será adotada tenta trazer, novamente, para a mão do ser humano a “palavra final” no processo, até o momento, ao longo de toda a metodologia proposta neste trabalho, seleção ou rejeição de alternativas foi feita baseada apenas em princípios matemáticos. No entanto, não é desejável que uma decisão importante que demandará recursos e influirá diretamente no bem estar da população seja tomada apenas tendo por base um conjunto de fórmulas, sem nenhum aspecto humano para julgar o que seria melhor.

Tendo em vista um conjunto muito grande de alternativas e objetivos na abordagem visada neste trabalho, torna-se laborioso escolher alguma solução dada a dificuldade do ser humano em lidar com uma quantidade muito grande de dados. Por esse motivo, foram desenvolvidos métodos que procuram auxiliar na escolha de alternativas considerando, para isso, o juízo ou as preferências de quem decide. As rotinas que auxiliam o decisor nessa escolha se enquadram nos chamados métodos multicriteriais.

Devido à natureza dos problemas e ao elevado grau de abstração apresentado pelos modelos em problemas multiatributos, é recomendado o emprego de mais de uma metodologia multicriterial uma vez que pode haver uma distorção das preferências do decisor por parte do método (SALMINEN ET AL, 1998; ZANAKIS ET AL., 1998). Deste modo, foram empregados dois métodos, ELECTRE III e o PROMETHEE para se avaliar as alternativas encontradas. Essa escolha decorreu da concepção e do elevado grau de aceitação dos métodos. Estas duas metodologias foram escolhidas por apresentarem formulações baseadas em lógica difusa, que é recomendada para problemas com incertezas. Esses métodos também requerem estruturas de dados de entrada, a serem fornecidos pelo decisor muito semelhantes. Um detalhamento desses métodos foi feito no item 3.3.

O processo de seleção das alternativas busca extrair a alternativa de maior compatibilidade, a partir de um conjunto de opções e de parâmetros de escolha do decisor. Como âmbito desse trabalho não é fazer uma análise das preferências do tomador de decisão nem quantificá-las, considerou-se que caberia ao próprio autor o papel do tomador de decisão.

4.6 Redes Empregadas no Estudo

Foram escolhidas quatro redes para a aplicação da metodologia ora proposta. Duas destas são teóricas sendo usualmente empregadas na literatura para testes de metodologias. As outras duas redes são reais e já implementadas. As redes testes serão utilizadas para a definição dos componentes do modelo: método de análise hidráulica e operadores do algoritmo de otimização, bem como a validação inicial da metodologia.

O primeiro sistema real escolhido é o responsável pelo abastecimento do bairro do Bassa na cidade de João Pessoa-PB. Esta rede foi escolhida, pois vem sendo frequentemente utilizada por vários autores brasileiros para validar os seus modelos de otimização (LEAL 1995, FORMIGA 1999, LOPES 2003). Por se tratar de um exemplo real, seu layout, será útil na avaliação da aplicabilidade do modelo.

Outro caso real estudado neste trabalho é a rede do setor RF1 de Campo Grande. Esta rede tem se mostrado problemática devido ao grande desnível do terreno, e tem sido foco de diversos estudos por parte dos pesquisadores da EESC/USP para buscar a melhoria dos índices de perdas nas tubulações, que se mostraram altos (CHEUNG, 2004; SOARES, CHEUNG e REIS, 2004a, SOARES, CHEUNG e REIS, 2004b, SOARES, REIS, CARRIJO, 2004). Foi escolhida também com o objetivo de se testar também uma metodologia de locação de Válvulas Redutoras de Pressão simultaneamente à definição dos diâmetros da rede de modo a melhorar os índices de performance hidráulica do sistema. Além disso, de apresenta características topográficas totalmente diferentes das outras duas redes utilizadas.

4.6.1 Rede Teste I

Este layout utilizado foi empregado por Souza (1994) e Formiga et al. (2003). As características dos nós da rede Teste I são apresentadas nas Tabela 4.1 enquanto que os dados dos trechos são mostrados na Tabela 4.2. O layout do sistema bem como a localização dos componentes na rede podem ser vistos na Figura 4.12.

A principal vantagem dessa configuração está no fato dela possuir os componentes hidráulicos que serão empregados neste trabalho, válvulas de retenção e redutora de pressão, sendo portanto, ideais para a avaliação do comportamento de modelos de análise hidráulica. O foco desta rede no trabalho está em verificar o funcionamento das metodologias de simulação do comportamento hidráulico da rede

considerando a demanda dependente da pressão e os vazamentos da rede. Assim foram necessárias pequenas modificações nos dados originais da rede.

Tabela 4.1 - Dados referentes aos nós da Rede I

Nó	Z (m)	Q (l/s)	hdes (m)	hmin (m)	θ	Nó	Z (m)	Q (l/s)	hdes (m)	hmin (m)	θ
1	0	39	25	15	1.18	12	0	57	25	15	1.18
2	0	57	25	15	1.18	13	0	18	25	15	1.18
3	0	96	25	15	1.18	14	0	39	25	15	1.18
4	0	18	25	15	1.18	15	0	39	25	15	1.18
5	0	39	25	15	1.18	16	0	18	25	15	1.18
6	0	57	25	15	1.18	17	0	39	25	15	1.18
7	0	39	25	15	1.18	18	0	57	25	15	1.18
8	0	39	25	15	1.18	19	0	39	25	15	1.18
9	0	39	25	15	1.18	20	0	39	25	15	1.18
10	0	39	25	15	1.18	21	0	18	25	15	1.18
11	0	18	25	15	1.18	22	100/50	-	-	-	-

Tabela 4.2 - Dados referentes aos trechos da Rede I

Trecho	Nó Mont.	Nó Jus.	Comp (m)	Diam (mm)	ϕ	Trecho	Nó Mont.	Nó Jus.	Comp (m)	Diam (mm)	ϕ
1	1	2	335	150	1E-07	15	12	13	335	300	1E-07
2	3	2	335	150	1E-07	16	12	10	244	300	1E-07
3	7	3	150	150	1E-07	17	15	9	366	300	1E-07
4	5	1	244	200	1E-07	18	18	12	305	450	1E-07
5	6	2	274	200	1E-07	19	17	15	244	300	1E-07
6	11	7	305	200	1E-07	20	14	15	305	150	1E-07
7	5	6	396	200	1E-07	21	16	14	244	150	1E-07
8	4	5	183	150	1E-07	22	17	16	305	150	1E-07
9	8	4	244	150	1E-07	23	19	18	457	500	1E-07
10	9	8	244	250	1E-07	24	21	19	305	500	1E-07
11	10	9	305	200	1E-07	25	20	17	244	400	1E-07
12	10	6	183	300	1E-07	26	22	20	457	400	1E-07
13	10	11	335	250	1E-07	27	22	21	305	600	1E-07
14	13	11	274	300	1E-07	-	-	-	-	-	-

Quanto aos componentes da rede, a VRP funcionará quando a pressão à montante for superior a $90 m_{H_2O}$. A rugosidade dos tubos foi tomada como sendo igual a 1 mm, uma vez que a equação empregada será a Fórmula Universal pra perda de carga, implicando em um valor de 2 para o expoente α da equação 4.23.

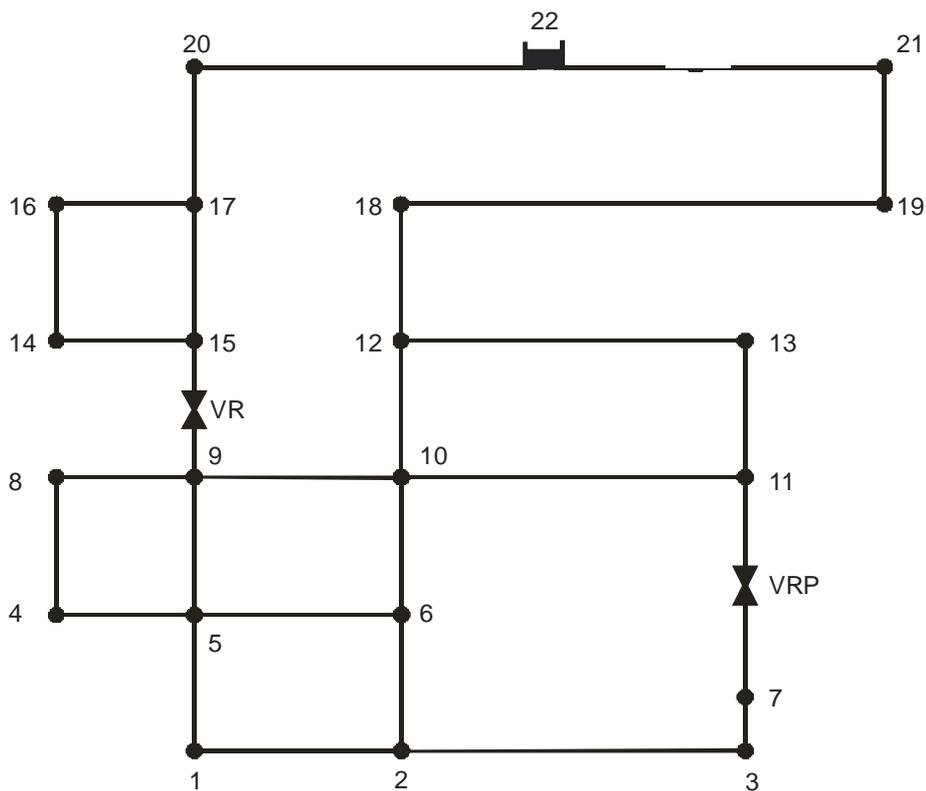


Figura 4.12 - Layout da rede Teste I

4.6.2 Rede Dois Anéis (Two-Loop)

A rede “Dois Anéis”, proposta por Alperovitz e Shamir (1977), tem sido empregada desde então como rede teste para verificar a adequação e aplicabilidade de diferentes metodologias de dimensionamento ótimo de sistemas de distribuição de água. Walski (1995) critica a adoção de redes de pequena dimensão por parte dos pesquisadores que empregam esse tipo de layout para validar seus trabalhos. No entanto, quando se está em fase de desenvolvimento de uma metodologia, é preferível, inicialmente, abordar um problema já estudado e de pequena dimensão, onde pequenos ajustes e adaptações podem ser feitos, e posteriormente se estudar casos reais, de maior porte.

A rede “Dois Anéis” é um layout composto por 6 (seis) nós consumidores e 1 (um) reservatório, conectados entre si por 8 (oito) trechos que formam dois circuitos. A Figura 4.13 mostra o esquema dessa rede.

Neste estudo efetuou-se uma pequena modificação nos dados da rede originalmente proposta, pois no lugar de se utilizar a formulação de perda de carga de Hazen-Williams, empregou-se a fórmula Universal de Darcy -Weissbach. Com isso, adotou-se para todos os tubos o valor da rugosidade como sendo igual a 0,1 mm,

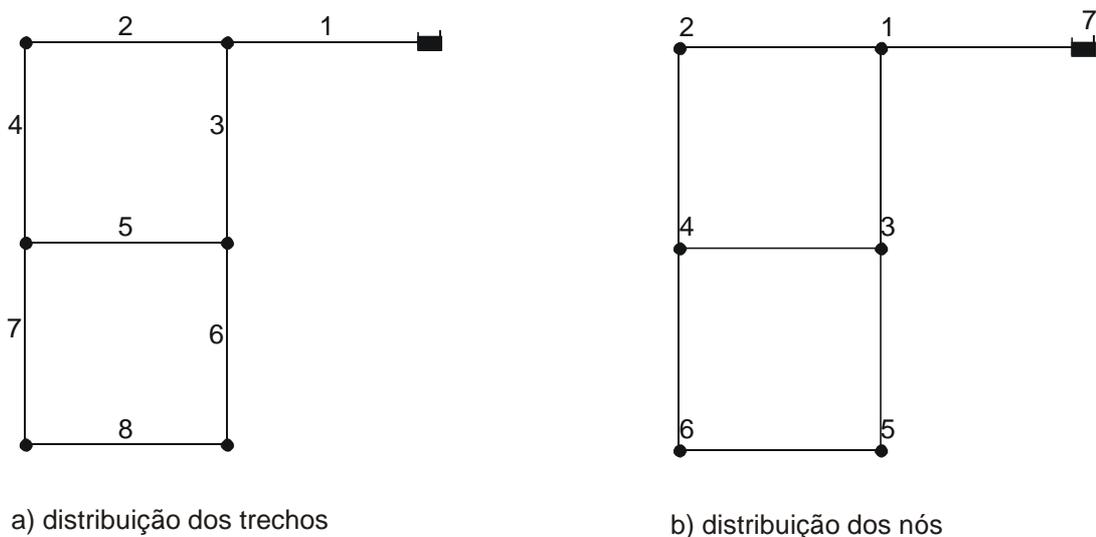
equivalente ao Ferro Fundido Revestido (PORTO 1998), no lugar do valor do coeficiente de perda de carga, que no problema original era de $C = 130$. O fator de atrito f , dessa formulação, foi obtido a partir da fórmula de Swamee e Jain (1974):

$$f = \frac{1,325}{\left[\ln \left(\frac{\varepsilon}{3,7d} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^2} \quad (4.86)$$

em que ε é a rugosidade absoluta da parede interna do tubo (mm), D é o diâmetro interno do tubo (mm) e Re é o número de Reynolds do escoamento.

Outra modificação introduzida no problema originalmente proposto foi a consideração de que a rede implantada irá apresentar perdas por vazamentos. Como não se conhece de antemão qual é o coeficiente de vazamento do sistema, empregou-se o valor de φ da formulação de Tucciarelli, Criminisi e Termini (1999) como sendo igual a 10^{-7} . O valor do expoente de vazamento (θ) foi tomado como sendo igual a $1,18$. Esses valores foram adotados por estarem situados na faixa dos mais comumente encontrados em trabalhos da literatura (JOWITT E XU, 1990; TUCCIARELLI, CRIMINISI E TERMINI 1999; CHEUNG, 2004).

Os dados das demandas, cotas, pressões desejáveis, cargas piezométricas mínimas admitidas e expoentes de vazamentos dos nós são mostrados na Tabela 4.3. Os comprimentos dos trechos, sentidos positivos de fluxo e coeficientes de vazamentos são mostrados na Tabela 4.4. Os preços dos tubos por metro de comprimento são apresentados na Tabela 4.5.



a) distribuição dos trechos
b) distribuição dos nós
Figura 4.13 - Esquema da rede "Dois Anéis"

Tabela 4.3 - Dados referentes aos nós da “Dois Anéis”

Nó	Z (m)	Q (l/s)	h^{des} (m)	h^{min} (m)	θ
1	150	27.78	180	150	1.18
2	160	27.78	190	160	1.18
3	155	33.33	185	155	1.18
4	150	75.00	180	150	1.18
5	165	91.67	195	165	1.18
6	160	55.56	190	160	1.18
7	210	-	-	-	-

Tabela 4.4 - Dados referentes aos trechos da “Dois Anéis”

Trecho	Nó Mont.	Nó Jus.	Comp. (m)	φ
1	7	1	1000	1.E-07
2	1	2	1000	1.E-07
3	1	3	1000	1.E-07
4	2	4	1000	1.E-07
5	3	4	1000	1.E-07
6	3	5	1000	1.E-07
7	4	6	1000	1.E-07
8	5	6	1000	1.E-07

Tabela 4.5 - Custo unitário da tubulação em Unidades Monetárias para a rede “Dois Anéis”

Diametro (mm)	Custo (UMT/m)	Diametro (mm)	Custo (UMT/m)
25	2	350	60
50	5	400	90
100	11	450	130
150	16	500	170
200	24	550	300
250	32	600	550
300	50	-	-

4.6.3 Rede do Bairro do Bessa (João Pessoa - PB)

Um caso real já empregado em trabalhos de otimização de projetos de redes de distribuição de água no Brasil é a rede de abastecimento do bairro do Bessa na cidade de João Pessoa (LEAL, 1995; FORMIGA, 1999; LOPES, 2002, entre outros). Essa rede se caracteriza por apresentar uma topografia plana, o que pode ser

importante para avaliar a influência da topografia no projeto da rede, pois a quarta rede empregada neste trabalho apresenta um relevo muito acidentado.

A rede do Bessa foi projetada pela CAGEPA (Companhia de Águas e Esgoto da Paraíba) em 1982 (LEAL, 1995) sendo abastecida por um reservatório elevado (R-9) situado no bairro vizinho de Tambaú. O layout do sistema compreende uma linha tronco principal que se estende desde o reservatório até o anel principal da rede. Durante esse percurso não ocorre derivação no sistema. O anel principal abastece três setores que são conectados à rede apenas através no anel (Figura 4.14a e Figura 4.14b). A rede se estende por uma área de aproximadamente 600ha, tendo uma demanda projetada para abastecer cerca de 100 mil pessoas. Na Tabela 4.6, são apresentados os dados de cota, demanda e cotas piezométricas desejável e mínima requerida além dos expoentes do modelo de vazamento dos diferentes nós da rede do Bessa. Os sentidos arbitrados para vazões positivas comprimentos e coeficientes da formulação de vazamentos são mostrados na Tabela 4.7.

Os valores do coeficiente de vazamentos são proporcionais ao número de ligações feitas na área de abrangência de cada trecho ou nó (CORTES-ARREGUIN E OCHOA-ALEJO, 1997). Como os trechos pertencentes ao anel principal não estão diretamente ligados a nenhum usuário final, adotou-se para estes um valor menor do coeficiente de vazamento, 10^{-8} . Embora os trechos pertencentes aos setores façam parte da chamada *rede principal*, que não têm saída direta, os mesmos estão conectados à tubulação secundária, que abastece diretamente os domicílios e são nestes tubos que ocorre a maior parte dos vazamentos. Ademais, no processo de esqueletização da rede, as demandas distribuídas nesses trechos são concentradas diretamente nos nós da rede dos setores. Como os valores dos coeficientes de vazamento também devem refletir o que ocorre naquelas tubulações, adotou-se, para os trechos pertencentes aos setores da rede, valores desses coeficientes semelhantes aos encontrados para redes secundárias.

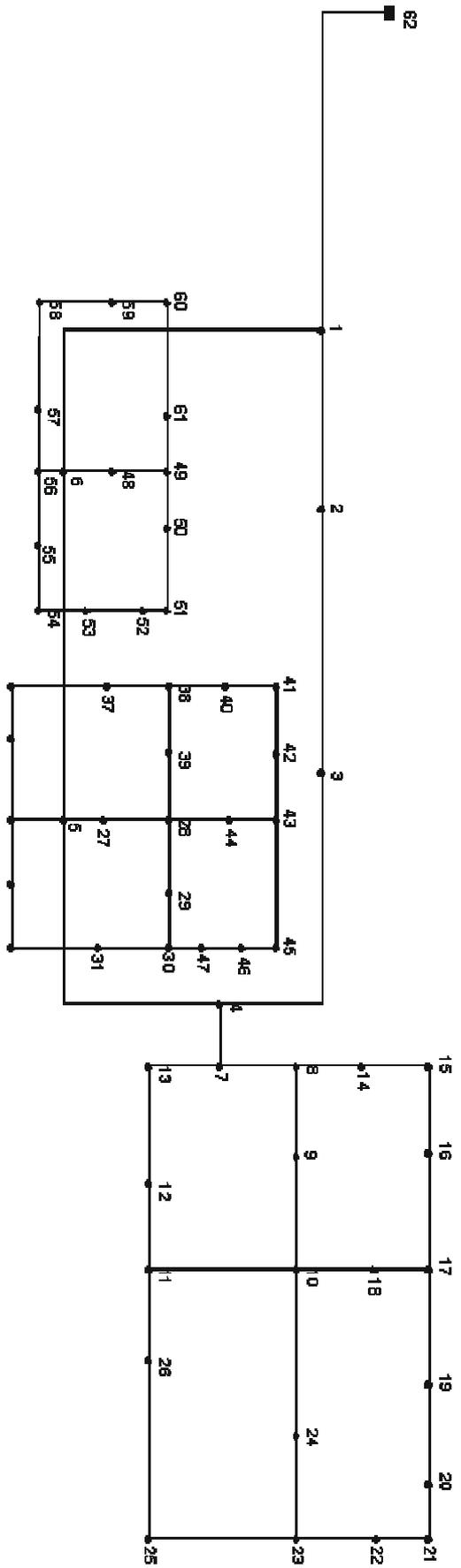


Figura 4.14a - Distribuição dos nós na rede do Bessa

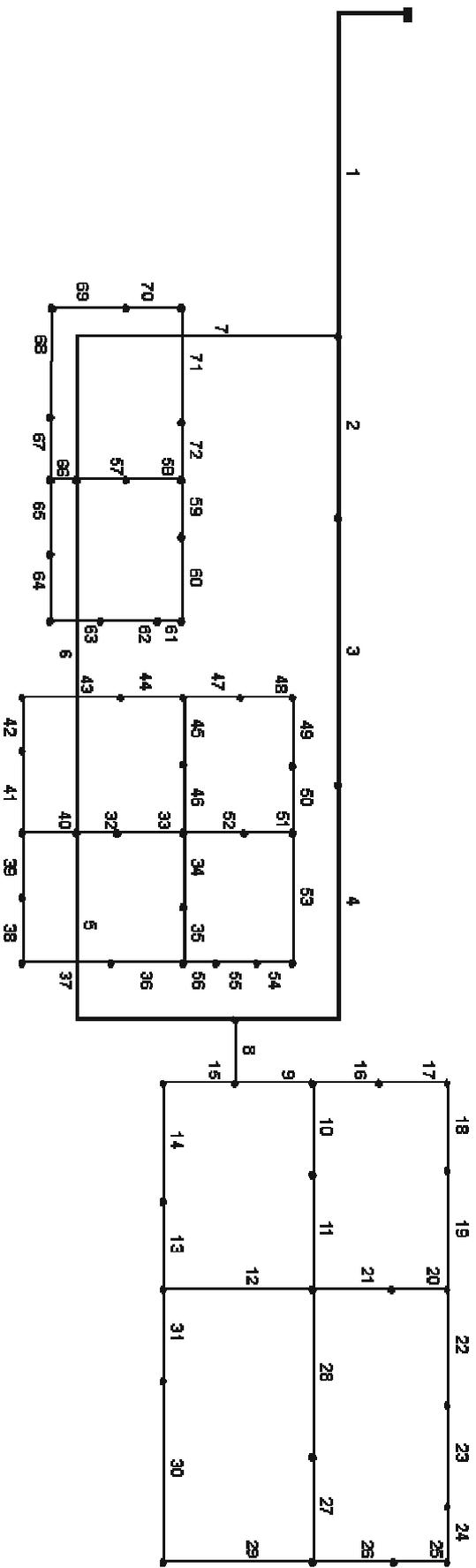


Figura 4.14 b - Distribuição dos trechos na rede do Bessa

Tabela 4.6 - Dados referentes aos nós da rede do Bessa

Nó	Z (m)	Q (l/s)	h^{des} (m)	h^{min} (m)	θ	Nó	Z (m)	Q (l/s)	h^{des} (m)	h^{min} (m)	θ
1	5.0	0.00	20.0	10.0	1.18	32	4.5	3.70	19.5	9.5	1.18
2	5.0	43.44	190.0	10.0	1.18	33	5.0	3.20	20.0	10.0	1.18
3	4.0	40.29	185.0	9.0	1.18	34	5.0	3.20	20.0	10.0	1.18
4	4.5	0.00	180.0	9.5	1.18	35	6.0	2.60	21.0	11.0	1.18
5	4.5	0.00	195.0	9.5	1.18	36	4.5	2.10	19.5	9.5	1.18
6	4.5	0.00	190.0	9.5	1.18	37	4.5	2.10	19.5	9.5	1.18
7	4.5	0.00	19.5	9.5	1.18	38	4.0	2.10	19.0	9.0	1.18
8	5.0	7.40	20.0	10.0	1.18	39	4.0	2.60	19.0	9.0	1.18
9	4.5	5.20	19.5	9.5	1.18	40	4.0	2.10	19.0	9.0	1.18
10	5.0	4.70	20.0	10.0	1.18	41	4.0	4.20	19.0	9.0	1.18
11	3.5	4.20	18.5	8.5	1.18	42	4.0	3.20	19.0	9.0	1.18
12	3.5	7.40	18.5	8.5	1.18	43	4.0	3.20	19.0	9.0	1.18
13	3.5	10.50	18.5	8.5	1.18	44	4.0	4.70	19.0	9.0	1.18
14	5.0	5.20	20.0	10.0	1.18	45	4.0	6.30	19.0	9.0	1.18
15	6.0	5.20	21.0	11.0	1.18	46	4.5	4.70	19.5	9.5	1.18
16	6.0	6.00	21.0	11.0	1.18	47	4.0	6.30	19.0	9.0	1.18
17	6.0	2.60	21.0	11.0	1.18	48	4.5	4.70	19.5	9.5	1.18
18	6.0	3.20	21.0	11.0	1.18	49	3.0	2.60	18.0	8.0	1.18
19	6.0	4.20	21.0	11.0	1.18	50	5.0	1.60	20.0	10.0	1.18
20	6.0	4.20	21.0	11.0	1.18	51	4.0	2.60	19.0	9.0	1.18
21	5.0	2.60	20.0	10.0	1.18	52	3.0	4.30	18.0	8.0	1.18
22	3.0	5.20	18.0	8.0	1.18	53	4.5	4.30	19.5	9.5	1.18
23	3.5	61.90	18.5	8.5	1.18	54	4.5	8.40	19.5	9.5	1.18
24	6.0	7.90	21.0	11.0	1.18	55	4.5	3.70	19.5	9.5	1.18
25	3.5	58.30	18.5	8.5	1.18	56	5.0	2.10	20.0	10.0	1.18
26	3.5	2.60	18.5	8.5	1.18	57	5.0	3.20	20.0	10.0	1.18
27	4.3	3.70	19.3	9.3	1.18	58	4.7	3.20	19.7	9.7	1.18
28	4.0	3.20	19.0	9.0	1.18	59	5.0	1.60	20.0	10.0	1.18
29	2.5	4.20	17.5	7.5	1.18	60	5.0	2.80	20.0	10.0	1.18
30	2.5	8.00	17.5	7.5	1.18	61	4.5	3.20	19.5	9.5	1.18
31	3.5	4.70	18.5	8.5	1.18	62	54.0	0.00	0.0	0.0	0

O material empregado nas tubulações de diâmetros iguais ou superiores a 300mm é o ferro fundido, enquanto que os diâmetros inferiores àquele valor são compostos de PVC. No projeto original foram utilizadas ainda algumas tubulações de cimento amianto (trechos 38, 39, 41, 42, 64, 65, 67 e 68) que possuem diâmetro igual a 200 mm.

No trabalho original (LEAL, 1995), a fórmula de perda de carga empregada foi a de Hazen-Williams com coeficientes de rugosidade, C , iguais a 145, 130 e 140, para PVC, ferro fundido e cimento amianto, respectivamente. Neste estudo a fórmula utilizada foi a de Darcy-Weisbach e os valores de rugosidade (em milímetros) utilizados foram de 0,01 para PVC; 0,025 para o amianto e 0,1 para o ferro fundido.

A Tabela 4.8 fornece os preços dos tubos em função dos seus diâmetros. Esses valores são relativos às tubulações com a mesma classe de pressão, e foram obtidos junto à CAGEPA (LEAL, 1995).

Tabela 4.7 - Dados referentes aos trechos da rede do Bessa

Trecho	Nó Mont.	Nó Jus.	Comp. (m)	φ	Trecho	Nó Mont.	Nó Jus.	Comp. (m)	φ
1	1	62	2540	1E-08	37	31	32	285	1E-07
2	1	2	350	1E-08	38	32	33	210	1E-07
3	2	3	1140	1E-08	39	33	34	240	1E-07
4	3	4	1430	1E-08	40	34	5	250	1E-07
5	5	4	1020	1E-08	41	34	35	340	1E-07
6	5	6	1430	1E-08	42	35	36	270	1E-07
7	1	6	1710	1E-08	43	36	37	240	1E-07
8	4	7	220	1E-07	44	37	38	160	1E-07
9	7	8	190	1E-07	45	38	39	260	1E-07
10	9	8	295	1E-07	46	39	28	250	1E-07
11	10	9	390	1E-07	47	38	40	330	1E-07
12	11	10	370	1E-07	48	40	41	230	1E-07
13	12	11	190	1E-07	49	41	42	385	1E-07
14	13	12	310	1E-07	50	42	43	160	1E-07
15	7	13	205	1E-07	51	43	44	330	1E-07
16	8	14	305	1E-07	52	44	28	210	1E-07
17	14	15	295	1E-07	53	43	45	150	1E-07
18	15	16	300	1E-07	54	45	46	255	1E-07
19	16	17	290	1E-07	55	46	47	260	1E-07
20	17	18	180	1E-07	56	47	30	230	1E-07
21	18	10	315	1E-07	57	6	48	115	1E-07
22	17	19	300	1E-07	58	48	49	180	1E-07
23	19	20	295	1E-07	59	49	50	140	1E-07
24	20	21	215	1E-07	60	50	51	215	1E-07
25	21	22	140	1E-07	61	51	52	175	1E-07
26	22	23	220	1E-07	62	52	53	180	1E-07
27	23	24	220	1E-07	63	53	54	260	1E-07
28	24	10	285	1E-07	64	54	55	205	1E-07
29	23	25	300	1E-07	65	55	56	255	1E-07
30	25	26	315	1E-07	66	56	6	260	1E-07
31	26	11	170	1E-07	67	56	57	275	1E-07
32	5	27	110	1E-07	68	57	58	315	1E-07
33	27	28	280	1E-07	69	58	59	200	1E-07
34	28	29	225	1E-07	70	59	60	175	1E-07
35	29	30	200	1E-07	71	60	61	300	1E-07
36	30	31	190	1E-07	72	61	49	250	1E-07

Tabela 4.8 - Custo unitário da tubulação em Unidades Monetárias para a rede do Bessa

Diametro (mm)	Custo (UMT/m)	Diametro (mm)	Custo (UMT/m)
100	1629	350	11012
150	4054	400	12397
200	5769	450	15501
250	7718	500	17686
300	9237	600	23132

4.6.4 Rede do Sistema RF1 (Campo Grande- MS)

O terceiro sistema estudado neste trabalho é a rede abastecida pelo reservatório RF-1 (Reservatório Final 1) na cidade de Campo Grande-MS. Tal sistema é responsável pelo abastecimento dos bairros: Nova Campo Grande, Imá, Panamá, Popular, Santo Amaro, COPHASUL, Laranjeiras, São Francisco, Planalto, Vila Militar, Vila Alba e Sobrinho. A população final de projeto considerada para esta rede foi de 153 mil pessoas.

Do ponto de vista da pesquisa em projetos de sistemas de abastecimento de água, esse é um sistema novo, uma vez que não existe ainda nenhum trabalho publicado utilizando o mesmo. O primeiro estudo a utilizar tal trabalho foi a tese de doutorado desenvolvida por Cheung (2004), que emprega técnicas multiobjetivo para a reabilitação de redes. A adoção desse sistema neste trabalho se deu por dois motivos:

1. possibilidade de se comparar duas redes de porte relativamente igual porém com relevos bastante distintos, e
2. testar uma metodologia de locação de válvulas redutoras de pressão dentro do processo de otimização, o que só poderia ser efetuado em sistemas que possuíssem topografias acentuadas.

Todos os dados, incluindo os mapas, Plano Diretor do Sistema de Abastecimento, Planilhas de Cálculo de Projeções Populacionais, entre outros, utilizados neste trabalho foram obtidos junto à empresa Águas Guariroba S.A, após visita técnica à cidade de Campo Grande. Essa empresa é atualmente responsável pela prestação do serviço de abastecimento de água naquela cidade.

A rede original compreende um total de 400 nós e 420 trechos (Figura 4.15). Tal sistema apresenta um nível de repetição muito grande, principalmente nos trechos de pequenas ramificações que, na maioria dos casos emprega diâmetros mínimos admissíveis para redes primárias (100 mm). De modo a tornar o sistema mais tratável sob o ponto de vista da otimização, uma vez que os trechos com diâmetros mínimos não teriam os seus valores modificados, empregou-se um processo de esqueletização, o que resultou na rede apresentada nas Figuras 4.16 e 4.17.

Os dados de cotas do terreno, demandas e cotas piezométricas desejáveis e mínimas requeridas, além dos expoentes do modelo de vazamento dos diferentes nós da rede RF-1 são mostrados na Tabela 4.9. Na Tabela 4.10 são apresentados os

sentidos arbitrados para vazões positivas comprimentos e coeficientes da formulação de vazamentos.

Os valores dos coeficientes e expoentes de vazamentos foram tomados como sendo 10^{-7} e $1,18$, respectivamente. Para efeitos de comparação desta rede com o sistema do Bessa foram usados os mesmos valores para os preços dos tubos bem como os mesmos tipos de compostos dos tubos empregados.

Tabela 4.9 Dados referentes aos nós da rede do RF1

Nó	Z (m)	Q (l/s)	h^{des} (m)	h^{min} (m)	θ	Nó	Z (m)	Q (l/s)	h^{des} (m)	h^{min} (m)	θ
1	542.5	26.87	557.5	547.5	1.18	48	596.5	17.56	611.5	601.5	1.18
2	542.5	0.00	557.5	547.5	1.18	49	602.5	0.00	611.5	607.5	1.18
3	539.5	7.15	554.5	544.5	1.18	50	600.0	0.00	610.0	605.0	1.18
4	539.0	6.42	554.0	544.0	1.18	51	620.0	0.00	615.0	611.0	1.18
5	530.0	4.16	545.0	535.0	1.18	52	616.0	0.00	610.0	607.0	1.18
6	535.0	4.21	550.0	540.0	1.18	53	623.5	94.39	620.0	618.0	1.18
7	530.0	3.98	545.0	535.0	1.18	54	623.5	0.00	615.0	610.0	1.18
8	535.0	37.03	550.0	540.0	1.18	55	619.0	0.00	615.0	610.0	1.18
9	538.0	0.00	553.0	543.0	1.18	56	594.0	0.35	609.0	599.0	1.18
10	543.0	10.63	558.0	548.0	1.18	57	583.0	5.16	598.0	588.0	1.18
11	550.0	0.35	565.0	555.0	1.18	58	570.0	9.63	585.0	575.0	1.18
12	549.0	0.82	564.0	554.0	1.18	59	560.0	2.71	575.0	565.0	1.18
13	540.0	0.70	555.0	545.0	1.18	60	557.5	1.43	572.5	562.5	1.18
14	536.0	8.60	551.0	541.0	1.18	61	560.0	5.82	575.0	565.0	1.18
15	541.5	0.11	556.5	546.5	1.18	62	570.0	5.84	585.0	575.0	1.18
16	551.0	3.75	566.0	556.0	1.18	63	564.5	0.00	579.5	569.5	1.18
17	555.0	9.45	570.0	560.0	1.18	64	579.0	16.14	594.0	584.0	1.18
18	556.0	15.38	571.0	561.0	1.18	65	564.0	4.95	579.0	569.0	1.18
19	560.0	12.44	575.0	565.0	1.18	66	566.0	7.67	581.0	571.0	1.18
20	560.0	1.03	575.0	565.0	1.18	67	562.5	1.77	577.5	567.5	1.18
21	562.0	8.27	577.0	567.0	1.18	68	567.0	5.40	582.0	572.0	1.18
22	563.0	16.77	578.0	568.0	1.18	69	572.5	2.23	587.5	577.5	1.18
23	555.0	4.72	570.0	560.0	1.18	70	574.0	0.00	589.0	579.0	1.18
24	550.0	0.00	565.0	555.0	1.18	71	577.0	9.52	592.0	582.0	1.18
25	550.0	0.65	565.0	555.0	1.18	72	581.0	16.64	596.0	586.0	1.18
26	565.5	8.41	580.5	570.5	1.18	73	581.0	0.00	596.0	586.0	1.18
27	567.0	1.52	582.0	572.0	1.18	74	577.5	0.00	592.5	582.5	1.18
28	571.0	6.08	586.0	576.0	1.18	75	576.5	0.00	591.5	581.5	1.18
29	573.0	0.00	588.0	578.0	1.18	76	577.0	0.00	592.0	582.0	1.18
30	575.0	0.00	590.0	580.0	1.18	77	581.0	17.30	596.0	586.0	1.18
31	575.0	10.63	590.0	580.0	1.18	78	581.3	12.98	596.3	586.3	1.18
32	571.0	1.61	586.0	576.0	1.18	79	567.5	0.00	582.5	572.5	1.18
33	569.0	6.02	584.0	574.0	1.18	80	571.5	11.30	586.5	576.5	1.18
34	574.0	4.76	589.0	579.0	1.18	81	569.0	2.70	584.0	574.0	1.18
35	572.0	24.39	587.0	577.0	1.18	82	565.0	1.92	580.0	570.0	1.18
36	576.0	0.00	591.0	581.0	1.18	83	565.0	5.62	580.0	570.0	1.18
37	574.0	6.17	589.0	579.0	1.18	84	567.0	0.00	582.0	572.0	1.18
38	577.5	0.00	592.5	582.5	1.18	85	568.0	15.92	583.0	573.0	1.18
39	577.5	1.73	592.5	582.5	1.18	86	572.0	11.93	587.0	577.0	1.18
40	582.0	0.00	597.0	587.0	1.18	87	578.0	7.26	593.0	583.0	1.18
41	590.0	0.00	590.0	585.0	1.18	88	576.0	27.30	591.0	581.0	1.18
42	587.0	0.00	595.0	590.0	1.18	89	571.5	4.18	586.5	576.5	1.18
43	587.0	0.60	602.0	592.0	1.18	90	570.0	7.96	585.0	575.0	1.18
44	582.5	7.36	597.5	587.5	1.18	91	570.0	0.00	585.0	575.0	1.18
45	585.0	0.00	600.0	590.0	1.18	92	564.0	0.00	579.0	569.0	1.18
46	580.5	12.26	595.5	585.5	1.18	93	568.5	18.09	583.5	573.5	1.18
47	583.0	0.00	598.0	588.0	1.18	94/95	624.0	-	-	-	-

Tabela 4.10 Dados referentes aos trechos da rede do RF1

Trecho	Nó Mont.	Nó Jus.	Comp. (m)	φ	Trecho	Nó Mont.	Nó Jus.	Comp. (m)	φ
1	2	1	210	1E-07	53	51	50	440	1E-08
2	3	2	525	1E-07	54	52	51	320	1E-08
3	4	3	770	1E-07	55	53	52	255	1E-08
4	5	4	340	1E-07	56	54	53	5	1E-08
5	5	6	250	1E-07	57	94	54	17	1E-08
6	6	7	72	1E-07	58	95	54	17	1E-08
7	7	15	740	1E-07	59	51	55	1860	1E-08
8	9	8	250	1E-07	60	55	56	1337	1E-08
9	10	9	360	1E-07	61	57	56	190	1E-08
10	11	10	960	1E-07	62	57	58	615	1E-07
11	12	11	920	1E-07	63	59	58	200	1E-07
12	13	12	230	1E-07	64	59	60	275	1E-07
13	14	13	580	1E-07	65	60	61	750	1E-07
14	15	14	315	1E-07	66	61	62	250	1E-07
15	16	15	765	1E-07	67	62	63	770	1E-07
16	17	16	270	1E-07	68	63	64	775	1E-07
17	17	18	162	1E-07	69	64	65	529	1E-07
18	18	19	580	1E-07	70	66	65	450	1E-07
19	19	20	400	1E-07	71	66	67	230	1E-07
20	21	20	280	1E-07	72	67	68	146	1E-07
21	21	22	480	1E-07	73	69	68	190	1E-07
22	23	22	455	1E-07	74	69	70	100	1E-07
23	23	24	365	1E-07	75	70	71	240	1E-07
24	24	25	190	1E-07	76	71	72	290	1E-07
25	17	25	245	1E-07	77	72	64	235	1E-07
26	26	20	505	1E-07	78	73	72	30	1E-07
27	27	26	160	1E-07	79	74	71	25	1E-07
28	27	28	446	1E-07	80	78	73	425	1E-07
29	29	28	120	1E-07	81	77	78	145	1E-07
30	29	30	370	1E-07	82	77	76	530	1E-07
31	30	31	335	1E-07	83	76	75	430	1E-07
32	32	31	430	1E-07	84	74	75	55	1E-07
33	33	32	120	1E-07	85	73	74	290	1E-07
34	33	27	496	1E-07	86	75	79	600	1E-07
35	29	34	264	1E-07	87	79	80	474	1E-07
36	35	34	207	1E-07	88	76	80	500	1E-07
37	36	35	310	1E-07	89	81	80	646	1E-07
38	36	37	120	1E-07	90	82	81	290	1E-07
39	38	37	310	1E-07	91	82	83	664	1E-07
40	39	38	45	1E-07	92	83	84	510	1E-07
41	40	39	270	1E-07	93	84	85	80	1E-07
42	41	40	340	1E-07	94	86	85	330	1E-07
43	41	42	140	1E-07	95	81	86	348	1E-07
44	42	43	300	1E-07	96	84	92	710	1E-07
45	43	44	448	1E-07	97	92	93	460	1E-07
46	44	45	630	1E-07	98	33	93	120	1E-07
47	45	46	466	1E-07	99	87	47	375	1E-07
48	46	47	145	1E-07	100	87	88	264	1E-07
49	47	31	386	1E-07	101	88	89	464	1E-07
50	48	41	328	1E-08	102	89	90	155	1E-07
51	49	48	490	1E-08	103	90	91	230	1E-07
52	50	49	840	1E-08	104	91	85	140	1E-07

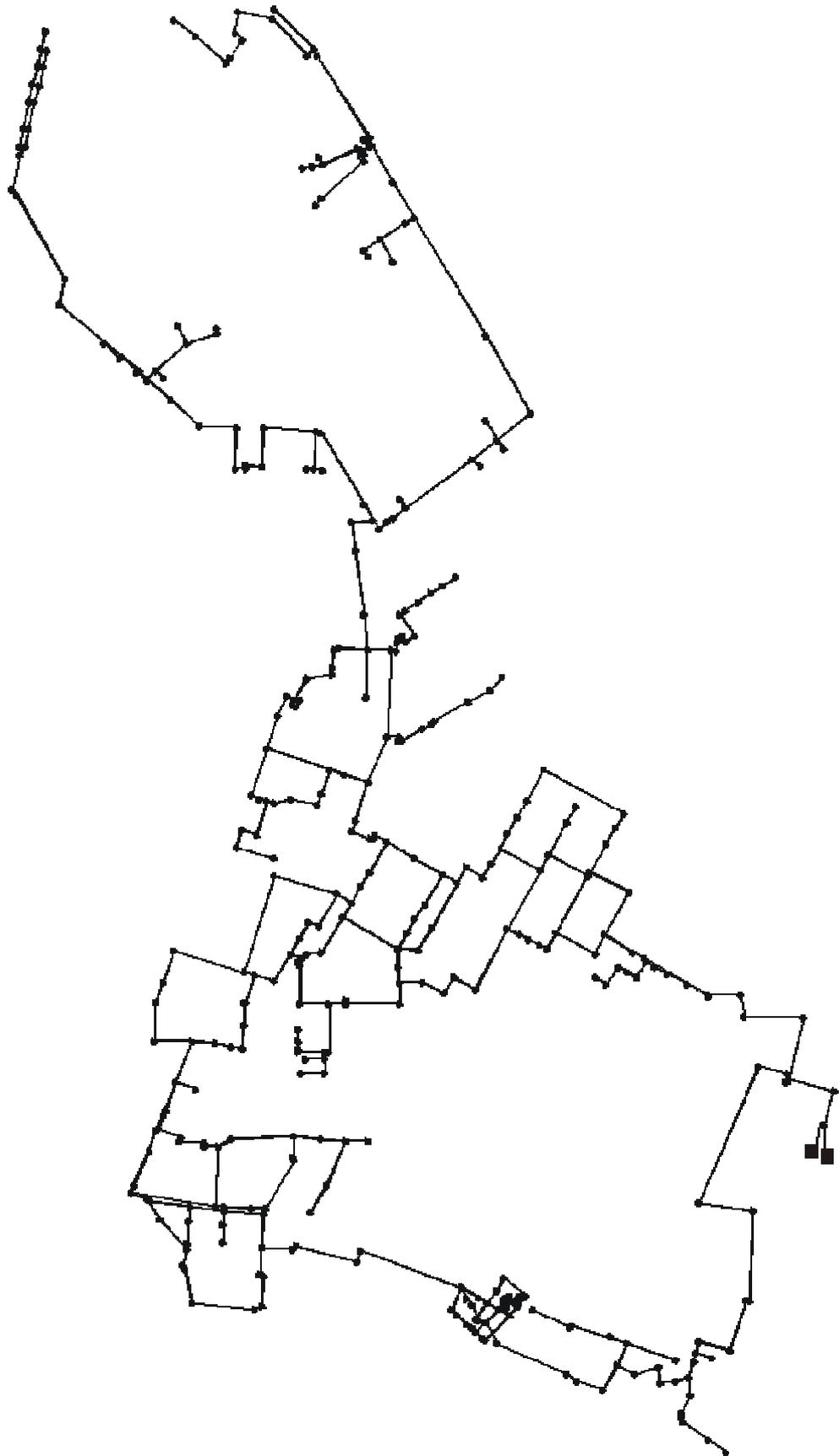


Figura 4.15 - Sistema RF1 original

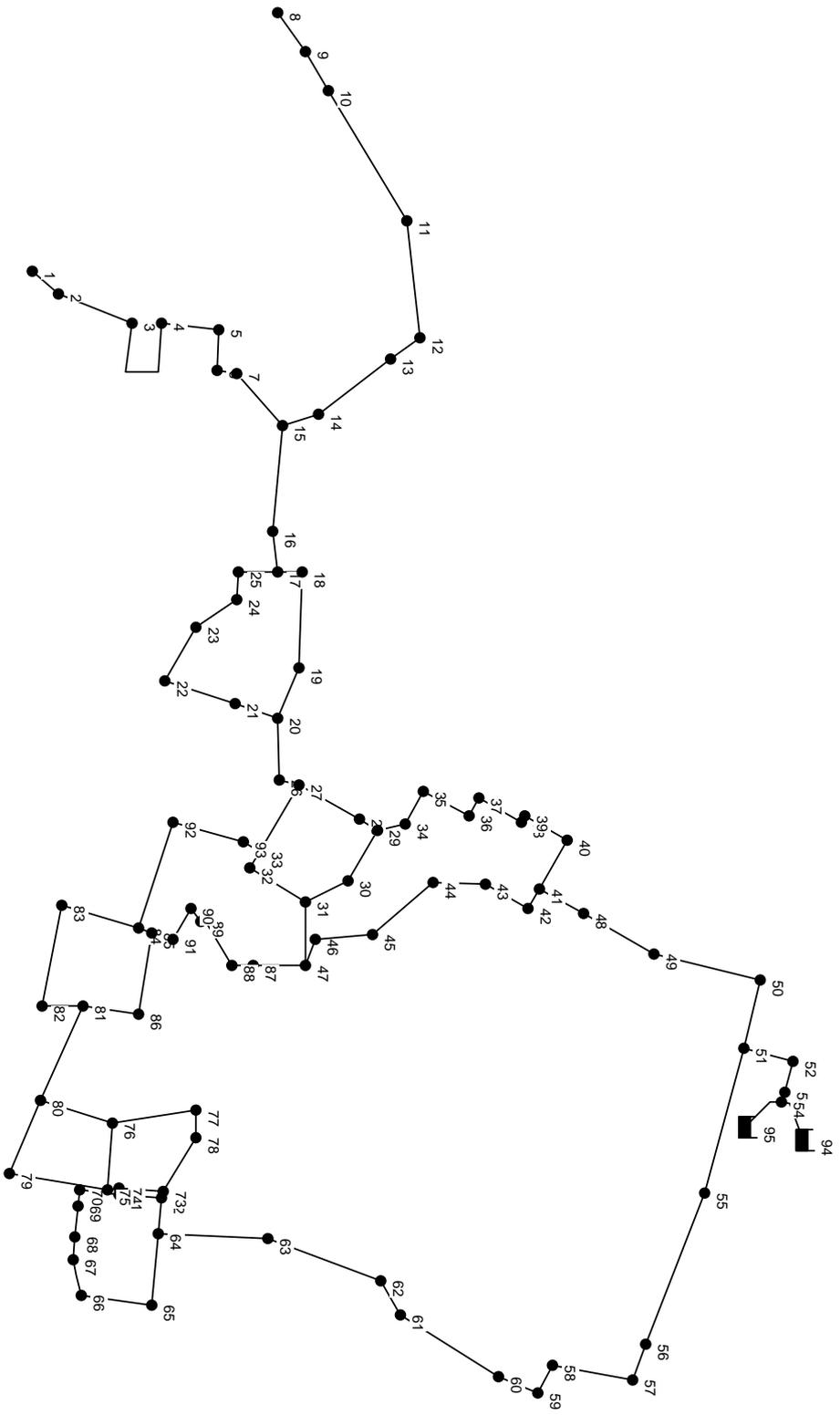


Figura 4.16 - Distribuição dos nós no sistema RF1, com esqueletização

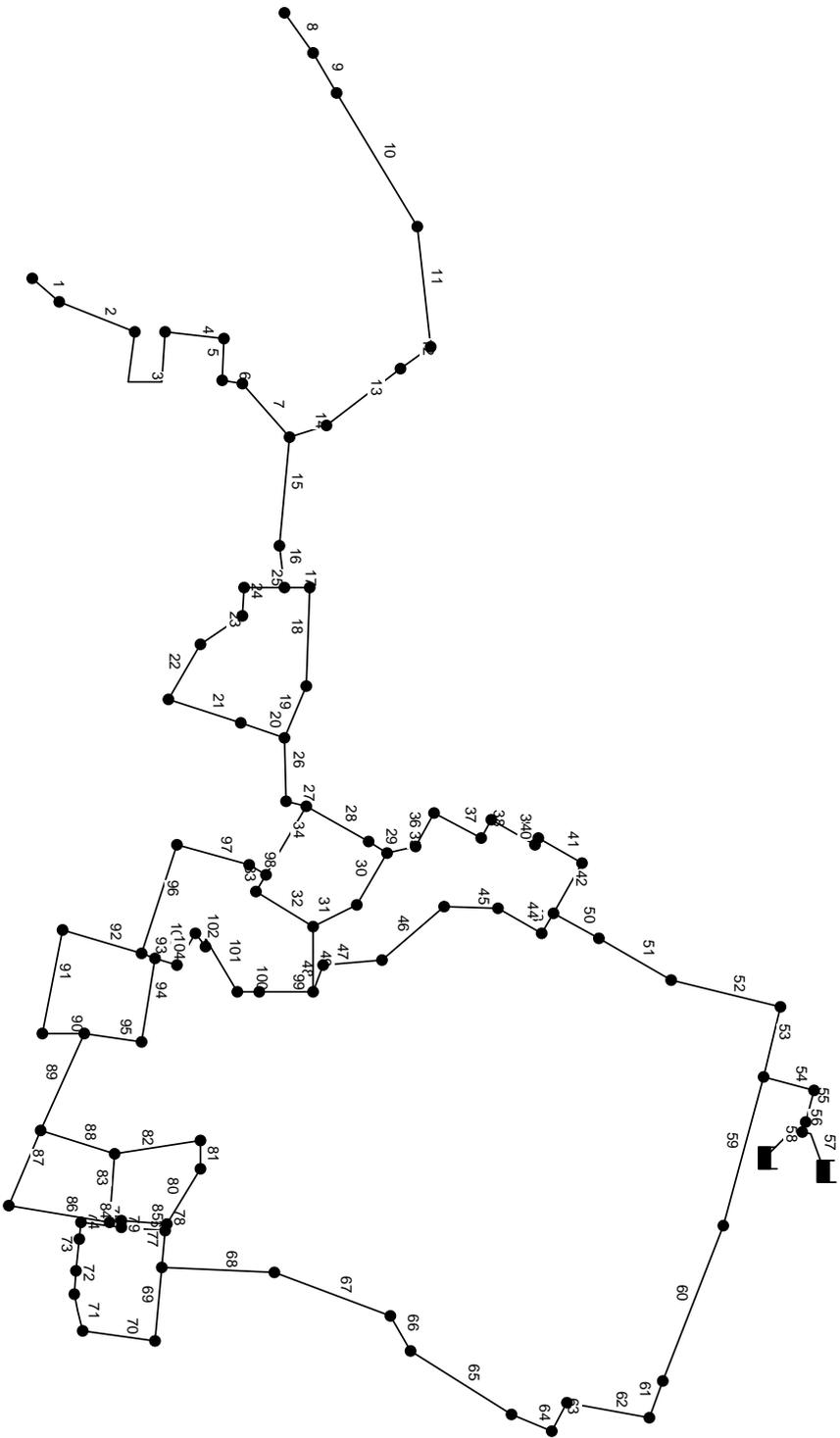


Figura 4.17 - Distribuição dos trechos no sistema RF1, com esqueletização

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta uma compilação dos diversos resultados obtidos pela aplicação da metodologia proposta neste trabalho. Com o intuito de deixar mais clara a exposição destes, organizou-se este capítulo em duas partes.

- definição das ferramentas e parâmetros
- aplicação da metodologia

Na primeira parte, serão definidos os seguintes itens: o modelo hidráulico para avaliação das alternativas, a metodologia multiobjetivo a ser empregada para geração de alternativas e os parâmetros a serem usados para essa metodologia.

Na etapa seguinte serão apresentados os resultados encontrados a partir da aplicação da metodologia proposta a três redes, conforme descrito no capítulo anterior.

5.1 Definição de Ferramentas e Parâmetros

Considerando as cinco etapas que compõem a metodologia proposta, verifica-se que, a *avaliação das alternativas* e a *geração das soluções não dominadas* apresentam os maiores níveis de complexidade, pois resultam da agregação de diversas técnicas, além de necessitarem de uma quantidade de processamento computacional elevada. As redes de distribuição de água são estruturas complexas, que demandam um elevado tempo computacional para o cálculo de seu balanço hidráulico. Desta forma, recomenda-se estudar o comportamento dessas técnicas quando aplicadas aos tipos de problemas propostos neste trabalho.

Inicialmente serão avaliadas as configurações do modelo hidráulico responsável pela avaliação das alternativas. Nesta etapa, será escolhido o modelo para resolução do balanço hidráulico da rede, bem como a técnica empregada para solução das equações lineares decorrentes do balanço. A seguir, serão escolhidos o método evolucionário multiobjetivo e os operadores a serem empregados.

5.1.1 Métodos de Resolução do Modelo Hidráulico

No capítulo anterior foram apresentados alguns métodos para realizar a simulação hidráulica. Cabe ressaltar que do ponto de vista dos valores obtidos pelos métodos, não existe nenhuma diferença significativa entre as técnicas. Entretanto,

sob a ótica da eficiência computacional, a escolha do método é muito importante, uma vez que a metodologia proposta neste trabalho requer a avaliação numérica de uma grande quantidade de configurações de redes.

O modelo hidráulico é composto por dois componentes principais objetos de teste nesta pesquisa. O primeiro se refere à forma de solução do sistema de equações *não-lineares* que faz os balanços de massa e energia nos nós. Para este item, foram avaliados dois métodos, a saber, método híbrido (NIELSEN, 1989) e método gradiente (TODINI E PILATTI, 1987). A outra parte corresponde à técnica de solução das equações *lineares* resolvidas a cada iteração do método de balanço hidráulico, para as quais diversos métodos de soluções foram avaliados

5.1.1.1 Método de Solução do Balanço Hidráulico

Os métodos comparados neste trabalho apresentam uma formulação semelhante, sendo diferentes em poucos, porém, importantes detalhes. Assim, do ponto de vista de eficiência computacional, o tempo gasto por esses métodos a cada iteração é muito semelhante, uma vez que os sistemas de equações resolvidos em cada passo são do mesmo tamanho ($n \times n$). A resolução desses sistemas é, sem dúvida nenhuma, o processo que requer o maior tempo computacional, podendo ser responsável por mais de 90% do tempo requerido a cada iteração. Dessa forma, aferiu-se a eficiência das metodologias para análise hidráulica de rede a partir do número de iterações necessárias para que o método convergisse, com um determinado nível de tolerância.

O critério de convergência escolhido foi o de que a maior diferença entre as cargas hidráulicas nos nós, de duas iterações consecutivas, fosse menor que uma tolerância (τ) pré-estabelecida, neste trabalho utilizou-se $\tau = 10^{-5}$. As cargas hidráulicas foram escolhidas para a análise da convergência pois estas são as variáveis mais sensíveis do sistema, uma vez que $h \sim q^2$.

Os métodos de balanço hidráulico foram testados para um total de 13 (treze) configurações de componentes e diferentes comportamentos da rede quanto à demanda dependente da pressão e vazamentos (Tabela 5.1).

Os números de iterações necessários para a convergência dos métodos para cada configuração Rede I são mostrados na Tabelas 5.2. Os valores das cargas hidráulicas nos nós e das vazões nos trechos são mostrados nas Tabelas 5.3 e 5.4.

Tabela 5.1 - Configurações estudadas da Rede I

Configuração	Método			
	Demanda Dirigida	Vazamento	VRP	VR
1				
2	X			
3	X		X	
4	X			X
5	X		X	X
6		X		
7		X	X	
8		X		X
9		X	X	X
10	X	X		
11	X	X	X	
12	X	X		X
13	X	X	X	X

Tabela 5.2 - Número de iterações dos métodos para diferentes configurações da Rede I

Configuração	Método	
	Gradiente	Híbrido
1	5	7
2	9	10
3	32	27
4	19	16
5	36	39
6	11	12
7	51	35
8	18	12
9	34	37
10	8	13
11	33	37
12	19	17
13	21	24

5.1.1.1.1 Análise dos Resultados

Verifica-se, a partir dos resultados encontrados, que o método do Gradiente foi aquele que conseguiu em um número menor de iterações para as redes desprovidas de componentes hidráulicos (Configurações 1, 2, 6 e 10) enquanto que, para a maioria das outras configurações, o método Híbrido conseguiu convergir com um número menor de iterações. Contudo de um modo geral, as duas formulações mostraram-se equivalentes uma vez que a diferença entre o número de iterações necessários à convergência foi pequena.

Tabela 5.3 - Cargas hidráulicas nos nós (em mH₂O) para as diferentes configurações da Rede I

Nó	Configuração												
	1	2	3	4*	5	6	7	8*	9	10	11	12*	13
1	63.85	22.24	21.06	22.10	21.58	58.09	42.20	57.09	46.88	21.70	20.73	21.58	21.15
2	63.50	22.26	21.10	22.10	21.68	57.82	42.23	56.62	47.64	21.72	20.78	21.59	21.25
3	52.31	18.78	18.26	18.68	18.56	46.71	32.50	45.28	38.59	18.52	18.08	18.43	18.33
4	68.66	24.71	22.82	24.96	23.10	63.19	44.36	63.52	47.62	24.03	22.50	24.26	22.72
5	66.52	23.60	22.14	23.51	22.66	60.88	44.15	60.11	48.17	22.98	21.78	22.91	22.22
6	74.67	29.41	27.25	28.94	28.60	69.88	55.30	68.27	62.56	28.58	26.76	28.16	27.88
7	64.47	24.09	22.98	23.82	23.69	59.36	46.04	57.75	52.75	23.57	22.63	23.34	23.23
8	77.90	31.23	27.45	32.47	27.03	73.44	48.16	76.35	48.04	30.31	27.26	31.44	26.87
9	80.42	33.35	29.28	34.74	28.74	76.25	49.92	79.51	49.02	32.45	29.15	33.71	28.66
10	79.60	33.12	30.63	32.52	32.29	75.35	61.28	73.49	69.47	32.26	30.14	31.71	31.53
11	79.65	33.27	31.10	32.73	32.52	75.40	62.61	73.65	69.84	32.40	30.55	31.92	31.75
12	86.68	38.78	37.38	38.43	38.30	83.60	75.74	82.53	80.24	38.06	36.87	37.75	37.65
13	82.36	35.35	33.50	34.89	34.72	78.47	67.76	77.00	73.83	34.50	32.93	34.09	33.95
14	81.04	32.63	36.24	33.39	34.24	77.19	87.28	78.93	82.71	31.59	34.80	32.28	33.05
15	84.94	36.85	41.23	37.77	38.79	81.55	93.96	83.66	88.29	36.02	39.95	36.86	37.80
16	82.62	34.04	37.29	34.72	35.48	78.92	88.09	80.48	83.88	33.02	35.91	33.64	34.33
17	91.14	42.11	44.37	42.58	43.10	88.98	95.55	90.06	92.45	41.53	43.55	41.95	42.43
18	90.64	42.04	41.11	41.81	41.72	88.34	83.13	87.63	86.10	41.47	40.67	41.26	41.19
19	95.08	45.79	45.32	45.67	45.63	93.76	91.14	93.40	92.63	45.44	45.04	45.34	45.30
20	93.72	44.38	45.93	44.70	45.06	92.13	96.66	92.86	94.51	43.94	45.33	44.23	44.56
21	98.55	48.75	48.62	48.72	48.71	98.12	97.36	98.02	97.79	48.63	48.52	48.60	48.59
22	100.00	50.00	50.00	50.00	50.00	100.00	100.00	100.00	100.00	50.00	50.00	50.00	50.00

Das configurações analisadas, aquelas que possuem VRPs são consideradas foram as que requereram maior esforço computacional, fato motivado pelo tipo de condição de contorno que este componente apresenta, com três possíveis estados, e descontinuidade nas derivadas de primeira ordem. Ademais, as formulações testadas mostraram-se sensíveis ao parâmetro *carga hidráulica de serviço*, (h_{red}), que é o nível que a linha piezométrica deve atingir após a VRP. Valores de h_{red} próximos aos valores finais da altura piezométrica à montante da válvula, ou muito baixos, provocam uma mudança frequente do tipo de condição de contorno do componente dentro do método de análise hidráulica, acarretando na necessidade de um número maior de iterações para que haja convergência do processo.

As condições de contorno das VRs, embora mais simples, são descontínuas, operando em apenas dois tipos de condições: aberta ou fechada, provocando também um aumento no número de iterações.

* Configurações em que o sentido positivo de fluxo foi mudado com o intuito de verificar o funcionamento da válvula de retenção

Considerando os resultados encontrados na comparação dos métodos, decidiu-se utilizar o método Gradiente nos casos em redes sem componentes, sendo o método Híbrido usado quando se for alocar as VRPs, no caso da rede do Sistema RF1.

Tabela 5.4 - Vazões nos trechos (em m³/s) para as diferentes configurações da Rede I

Trecho	Configuração												
	1	2	3	4*	5	6	7	8*	9	10	11	12*	13
1	0.006	-0.001	-0.002	0.000	-0.003	0.005	-0.002	0.007	-0.009	-0.002	-0.002	-0.001	-0.003
2	-0.037	-0.021	-0.019	-0.020	-0.019	-0.037	-0.035	-0.038	-0.034	-0.020	-0.018	-0.020	-0.019
3	0.059	0.039	0.036	0.038	0.038	0.060	0.062	0.059	0.063	0.038	0.036	0.037	0.037
4	0.045	0.032	0.028	0.033	0.028	0.046	0.039	0.048	0.031	0.031	0.028	0.032	0.028
5	0.088	0.070	0.065	0.069	0.069	0.092	0.096	0.090	0.102	0.069	0.064	0.067	0.068
6	0.098	0.076	0.071	0.075	0.074	0.100	0.102	0.100	0.104	0.074	0.070	0.073	0.073
7	-0.062	-0.053	-0.049	-0.051	-0.053	-0.066	-0.073	-0.062	-0.083	-0.052	-0.049	-0.050	-0.052
8	0.022	0.016	0.012	0.018	0.010	0.023	0.007	0.028	-0.011	0.015	0.012	0.017	0.010
9	0.040	0.033	0.028	0.036	0.026	0.042	0.025	0.047	0.008	0.033	0.028	0.035	0.027
10	0.079	0.072	0.067	0.075	0.065	0.083	0.066	0.089	0.049	0.073	0.068	0.075	0.066
11	0.022	0.011	-0.028	0	0	0.023	-0.084	0	0	-0.010	-0.024	0	0
12	0.208	0.180	0.171	0.176	0.179	0.219	0.229	0.214	0.246	0.179	0.171	0.176	0.178
13	-0.009	-0.015	-0.028	-0.019	-0.020	-0.009	-0.048	-0.016	-0.025	-0.015	-0.027	-0.018	-0.019
14	0.125	0.109	0.117	0.111	0.112	0.133	0.173	0.139	0.152	0.110	0.117	0.111	0.112
15	0.143	0.127	0.135	0.129	0.130	0.156	0.195	0.162	0.174	0.129	0.136	0.131	0.132
16	0.216	0.192	0.210	0.197	0.199	0.233	0.309	0.244	0.267	0.195	0.210	0.199	0.200
17	0.140	0.123	0.078	0.114	0.104	0.151	0.024	0.134	0.091	0.124	0.085	0.116	0.107
18	0.415	0.376	0.403	0.383	0.385	0.455	0.569	0.472	0.506	0.385	0.407	0.391	0.393
19	0.202	0.185	0.143	0.177	0.168	0.221	0.101	0.205	0.165	0.190	0.153	0.182	0.174
20	-0.023	-0.024	-0.026	-0.024	-0.025	-0.024	-0.030	-0.025	-0.028	-0.024	-0.026	-0.025	-0.025
21	0.016	0.015	0.013	0.015	0.014	0.017	0.011	0.016	0.014	0.015	0.013	0.015	0.015
22	0.034	0.033	0.031	0.033	0.032	0.037	0.032	0.036	0.034	0.034	0.032	0.034	0.033
23	0.472	0.433	0.460	0.440	0.442	0.523	0.637	0.540	0.574	0.446	0.468	0.452	0.454
24	0.511	0.472	0.499	0.479	0.481	0.574	0.688	0.591	0.626	0.491	0.512	0.496	0.498
25	0.275	0.258	0.213	0.249	0.239	0.304	0.179	0.287	0.245	0.266	0.227	0.258	0.249
26	0.314	0.297	0.252	0.288	0.278	0.352	0.228	0.335	0.293	0.308	0.270	0.301	0.292
27	0.529	0.490	0.517	0.497	0.499	0.604	0.717	0.621	0.655	0.514	0.535	0.519	0.521

5.1.1.2 Método de Solução dos Sistemas de Equações Lineares

Os métodos para análise de redes de distribuição de água são empregados na resolução de sistemas das mais variadas dimensões. Devido à dificuldade de se obter dados de sistemas reais de grande porte, e com o objetivo de normalizar a comparação, empregou-se uma rede padronizada segundo esquema apresentado na Figura 5.1 (FORMIGA et al, 2003). A rede apresenta mn nós sendo: $mn-1$ nós consumidores, com o mn -ésimo nó, representando o reservatório da rede. A colocação de um nó fonte é obrigatória para que o sistema resultante seja estritamente diagonalmente dominante, o que não ocorreria na falta deste.

Os métodos apresentados neste trabalho foram empregados na resolução de redes com dimensões que variam de 15 a 3599 nós ou, para o caso dos sistemas de equações, variáveis. Procurou-se considerar, para efeito de normalização, “redes

quadradas”, ou seja, com o mesmo valor de m e n , pois, verificou-se que a forma da rede (mais achatada ou não) é um fator que influencia no resultado.

Uma rede com disposição de nós semelhante à apresentada na Figura 5.1, produz uma matriz de coeficientes com uma estrutura de 5 diagonais (Figura 5.2a). Essa estrutura de matriz evita o chamado preenchimento, que caracteriza os métodos diretos de solução de sistemas. Nas redes analisadas na prática, esse tipo de enumeração, tão regular, não é possível de ser feito.

Com a finalidade de se verificar também o comportamento dos diversos métodos na resolução de sistemas mais gerais, aplicou-se um procedimento randômico de localização dos nós, através de uma permutação aleatória na matriz C . O resultado desse processo pode ser verificado na Figura 5.2b.

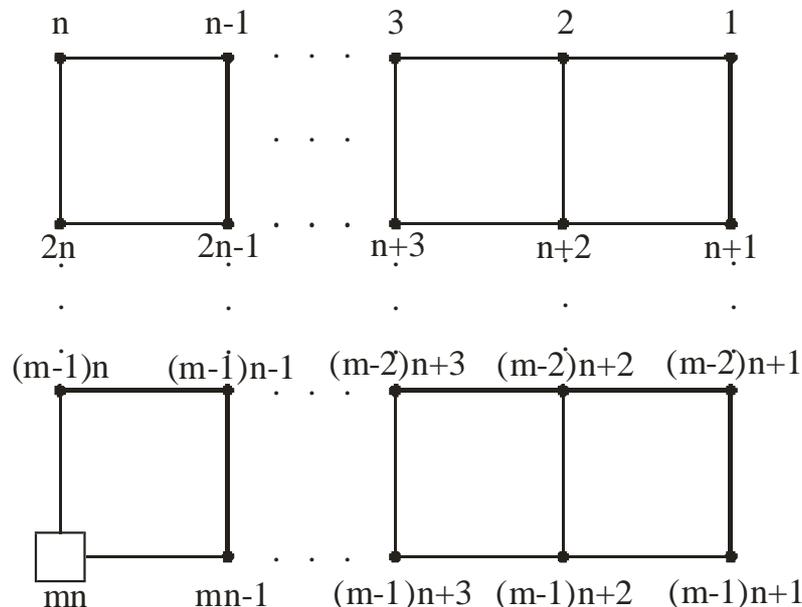


Figura 5.1 - Esquema das redes utilizadas para comparação

Os sistemas gerados neste trabalho foram resolvidos utilizando-se as rotinas presentes no software Matlab 6.1 para Windows, instalado numa estação de trabalho com plataforma AMD Athlon Dual + 1800 MP e 1Gb de RAM (2500 MFLOPS).

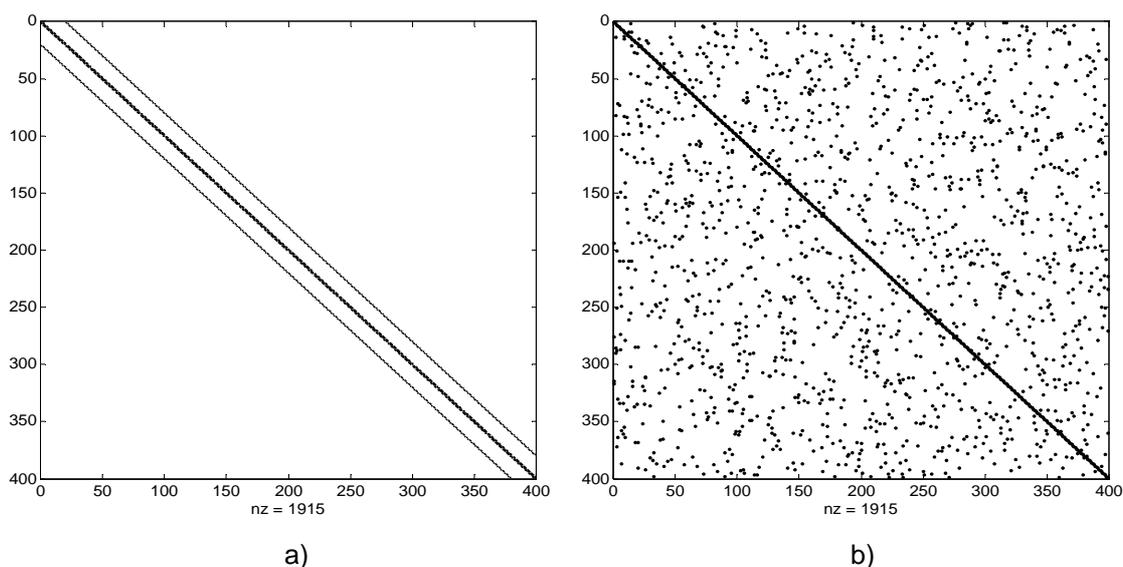


Figura 5.2 - Visualização do preenchimento da matriz A de Stieltjes com dimensões 400×400 para os casos de disposição *regular* (a) e *irregular* (b) dos nós.

5.1.1.2.1 Sistemas com Malha Regular

Na Tabela 5.5 e Figura 5.3 são apresentados os tempos (em segundos) para a resolução de diferentes redes hidráulicas com disposição *regular* de nós, considerando os vários métodos empregados. De modo a eliminar os efeitos das variações do desempenho da máquina, considerou-se o *tempo médio*, obtido a partir da resolução do mesmo sistema de equações 30 vezes com cada método.

Pode-se observar na Tabela 5.5 que, para o número de variáveis escolhido, o método de Gauss foi capaz de resolver mais rapidamente sistemas de até 48 variáveis. O método de Fatorização de Cholesky foi o mais eficiente para a faixa de sistemas que se estende de 48 até 1023 nós, enquanto que o Gradiente Conjugado Pré-condicionado Cholesky (GCPC) foi o mais apto em problemas com mais de 1023 variáveis.

Com base nos resultados da Tabela 5.5 efetuou-se uma análise de regressão entre o tempo médio de resolução e o número de variáveis do sistema, a função potência foi a que melhor se ajustou ao problema sendo expressa por:

$$Y = aX^b \quad (5.1)$$

em que Y é a variável dependente, neste caso o tempo médio de resolução; X a variável independente número de variáveis, e a e b são constantes de regressão. Os resultados dessa análise de regressão são apresentados na Tabela 5.6.

Tabela 5.5 - Tempo médio (em segundos) de resolução dos sistemas de equações de redes com disposição regular dos nós utilizando diferentes métodos

n	Nº de variáveis	Tempo de resolução (s)				
		Gauss	Cholesky	GC	GCPD	GCPC
4	15	1.50E-05	3.20E-05	1.56E-03	2.09E-03	5.80E-04
5	24	1.18E-04	1.57E-04	3.22E-03	3.99E-03	8.55E-04
7	48	3.15E-04	3.10E-04	5.08E-03	7.79E-03	1.13E-03
9	80	1.09E-03	5.70E-04	7.43E-03	1.19E-02	2.01E-03
10	99	2.88E-03	8.27E-04	1.28E-02	1.39E-02	2.77E-03
12	143	6.39E-03	1.54E-03	2.05E-02	2.44E-02	4.35E-03
14	195	1.28E-02	2.15E-03	2.91E-02	3.50E-02	6.15E-03
16	255	2.19E-02	3.70E-03	4.00E-02	4.55E-02	7.53E-03
20	399	6.88E-02	8.15E-03	7.57E-02	7.19E-02	1.23E-02
22	483	1.24E-01	1.02E-02	9.08E-02	9.04E-02	1.49E-02
28	783	4.42E-01	2.35E-02	1.77E-01	1.47E-01	2.55E-02
32	1023	9.59E-01	3.64E-02	2.62E-01	2.06E-01	3.35E-02
40	1599	1.93E+00	6.78E-02	4.53E-01	3.39E-01	5.33E-02
50	2499	6.42E+00	1.41E-01	7.69E-01	5.69E-01	8.47E-02
60	3599	1.78E+01	2.63E-01	1.25E+00	8.57E-01	1.35E-01

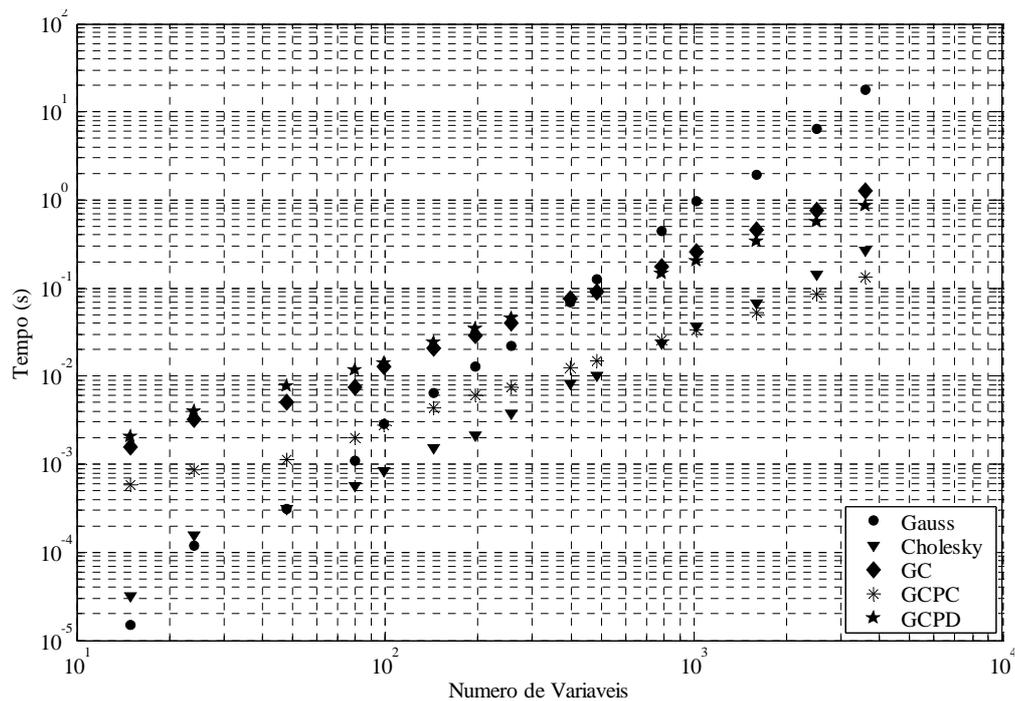


Figura 5.3 - Tempo médio X número de variáveis para redes com malha regular

Os resultados obtidos permitem determinar, para as redes simuladas, qual foi a faixa que cada método apresentou uma maior eficiência que outro. Entretanto, devido à quantidade relativamente pequena de redes analisadas não foi possível determinar esse intervalo com um nível desejado de precisão.

Desta forma, com base nos dados obtidos na curva de regressão, determinaram-se os pontos de intersecção das curvas “tempo computacional x nº de

variáveis” para as metodologias empregadas neste trabalho. Os resultados encontrados através da solução de equações não-lineares são mostrados na Tabela 5.7. Os termos em negrito neste tabela indicam os valores acima dos quais a metodologia disposta na linha é melhor do que a da coluna. Se o termo não estiver em negrito, o método da linha será melhor do que o da coluna para os valores inferiores aos apresentados. Por exemplo, o método GC será mais eficiente para sistemas de equações com mais de 310860 variáveis que o método Cholesky e com menos de 448 variáveis que o método GCPD.

Com base nestes resultados pode-se afirmar que para redes com malha regular, o método de Gauss é o mais adequado para sistemas com até 34 variáveis. Enquanto que a fatorização de Cholesky é o mais eficiente para matrizes de tamanhos entre 35 e 970, sendo recomendado para problemas maiores o método GCPC.

Na Tabela 5.8 são mostrados os números de condição das matrizes, de elementos não zeros e de iterações dos métodos Gradiente Conjugado (GC), Gradiente Conjugado Pré-condicionado Cholesky (GCPC) e Gradiente Conjugado Pré-condicionado Diagonal (GCPD). Verifica-se que a eficiência do pré-condicionamento do método Cholesky incompleto em que o número de iterações para problemas com mais de 500 variáveis chega a ser dez vezes menor que o requerido pelos outros dois métodos.

5.1.1.2.2 Sistemas com Malha Irregular

De modo semelhante ao que foi feito para as redes que têm seus nós dispostos de maneira regular, calculou-se os tempos necessários para a resolução de sistemas baseados numa distribuição irregular dos nós. Na Tabela 5.9 e na Figura 5.4 são mostrados os resultados dos tempos médios necessários para se resolver um sistema de equações que represente uma rede com nós dispostos irregularmente.

Tabela 5.6 - Resultado da análise de regressão (potencia) para as variáveis tempo x tamanho dos sistemas com malha regular

	a	b	R ²
Gauss	2.57E-08	2.48E+00	9.97E-01
Cholesky	6.35E-07	1.57E+00	9.95E-01
GC	4.68E-05	1.23E+00	9.95E-01
GCPC	2.79E-05	1.02E+00	9.94E-01
GCPD	1.10E-04	1.09E+00	9.99E-01

Tabela 5.7 - Pontos de interseção (número de variáveis), para sistemas com malha regular, das curvas de regressão dos diversos métodos.

	Gauss	Cholesky	GC	GCPD	GCPC
Gauss	-	34	406	410	120
Cholesky	34	-	310860	46109	970
GC	406	310860	-	448	0
GCPD	410	46109	448	-	0
GCPC	120	970	0	0	-

Tabela 5.8 - Números de condição das matrizes, de elementos não zeros, e de iterações requeridos pelos diferentes métodos de Gradiente Conjugado para sistemas com disposição regular dos nós

n	Número de variáveis	Nº de Condição	Nº de Elementos Não Zeros	Nº Iterações (GC)	Nº Iterações (GCPC)	Nº Iterações (GCPD)
4	15	179	59	15	6	15
5	24	377	100	25	7	24
7	48	888	212	51	9	42
9	80	1708	364	76	11	60
10	99	2687	455	81	11	70
12	143	3773	667	96	13	81
14	195	5609	919	114	14	103
16	255	7752	1211	134	15	116
20	399	12337	1915	165	16	146
22	483	21478	2327	192	18	165
28	783	26776	3803	242	20	205
32	1023	44798	4987	279	27	238
40	1599	63200	7835	345	34	301
50	2499	98307	12295	433	40	369
60	3599	154960	17755	538	49	461

Como no caso anterior, foi efetuada uma análise de regressão para os dados da Tabela 5 com base na função potencial (Eq. 5.1). Os coeficientes de regressão encontrados são mostrados na Tabela 5.10.

Na Tabela 5.11 são apresentados os pontos de interseção das curvas de regressão para os diversos métodos utilizados neste trabalho. Verifica-se novamente que os métodos de Gauss (até 40 variáveis), Cholesky (de 40 a 648 variáveis) e GCPC (acima de 648 variáveis) foram os mais eficientes.

Os números de condição das matrizes, de elementos não zeros e de iterações dos métodos GC, GCPC e GCPD são mostrados na Tabela 5.12.

Analisando a Tabela 5.9 e a Tabela 5.11, observa-se que o método GCPC passa a apresentar a mesma ordem de valores do método da Fatorização de Cholesky, quando o número de condição da matriz é maior que 10^4 , sendo o método mais eficiente para valores superiores a 3×10^4 .

Tabela 5.9 - Tempo médio (em segundos) de resolução dos sistemas de equações com disposição irregular da malha utilizando-se diferentes métodos.

n	Nº de variáveis	Tempo de resolução (s)				
		Gauss	Cholesky	GC	GCPD	GCPC
4	15	2.58E-05	5.74E-05	1.49E-03	2.81E-03	6.80E-04
5	24	1.18E-04	1.55E-04	3.28E-03	4.18E-03	1.13E-03
7	48	4.20E-04	4.70E-04	7.19E-03	1.12E-02	2.46E-03
9	80	2.00E-03	9.29E-04	1.41E-02	1.83E-02	4.06E-03
10	99	4.15E-03	1.47E-03	2.07E-02	2.37E-02	5.02E-03
12	143	1.11E-02	3.48E-03	3.02E-02	3.68E-02	8.17E-03
14	195	2.16E-02	5.58E-03	4.70E-02	5.55E-02	1.14E-02
16	255	4.84E-02	8.41E-03	7.08E-02	7.41E-02	1.55E-02
20	404	1.51E-01	2.13E-02	1.21E-01	1.34E-01	2.76E-02
22	500	5.19E-01	3.41E-02	1.49E-01	1.63E-01	3.85E-02
28	783	1.31E+00	6.97E-02	3.34E-01	2.70E-01	5.90E-02
32	1034	3.58E+00	1.24E-01	4.33E-01	3.72E-01	8.49E-02
40	1599	1.23E+01	2.62E-01	7.94E-01	5.96E-01	1.38E-01
50	2499	3.45E+01	4.81E-01	1.55E+00	9.68E-01	2.18E-01
60	3599	8.85E+01	7.59E-01	2.56E+00	1.50E+00	3.00E-01

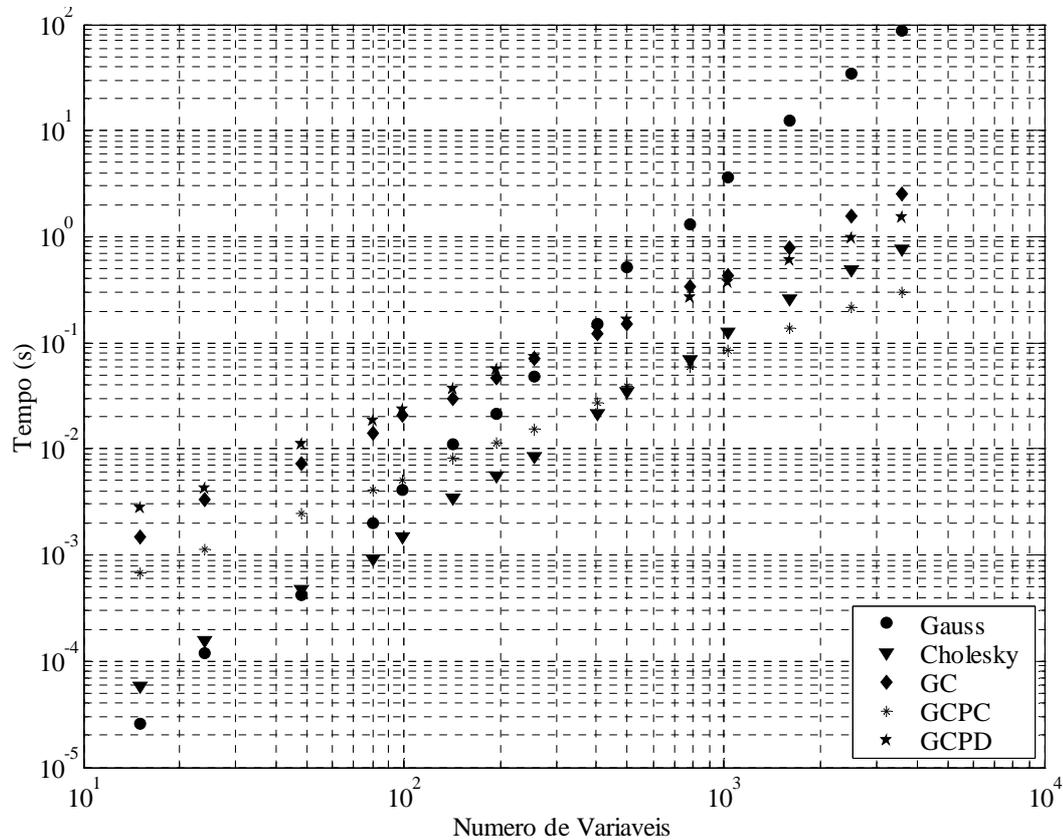


Figura 5.4 - Tempo médio x número de variáveis para os sistemas com malha irregular

Tabela 5.10 - Resultado da análise de regressão (potencia) para as variáveis tempo x tamanho do sistema com disposição irregular de nós

Método	a	b	R ²
Gauss	1.144E-08	2.788	0.988
Cholesky	4.948E-07	1.769	0.991
GC	4.072E-05	1.342	0.992
GCPC	3.242E-05	1.123	0.990
GCPD	1.191E-04	1.157	0.987

Tabela 5.11 - Pontos de interseção (número de variáveis), para sistemas com malha irregular, das curvas de regressão dos métodos estudados

	Gauss	Cholesky	GC	GCPD	GCPC
Gauss	-	40	286	410	118
Cholesky	40	-	30596	46109	648
GC	286	30596	-	448	0
GCPD	291	7786	331	-	0
GCPC	118	648	0	0	-

Tabela 5.12 - Números de condição das matrizes, de elementos não zeros, e de iterações requeridos pelos diferentes métodos de Gradiente Conjugado para sistemas com disposição irregular dos nós

n	Número de variáveis	Nº de Condição	Nº de Elementos Não Zeros	Nº Iterações (GC)	Nº Iterações (GCPC)	Nº Iterações (GCPD)
4	15	288	59	16.5	4	17
5	24	484	100	27.5	8	28
7	48	1291	212	55	12	48
9	80	2293	364	77	12	72
10	99	3037	455	85.8	13	81
12	143	4484	667	105.6	14	99
14	195	6688	919	124.3	17	113
16	255	8756	1211	146.3	18	132
20	399	14823	1915	181.5	21	168
22	483	24013	2327	204.6	23	186
28	783	33294	3803	265.1	29	239
32	1023	50516	4987	293.7	34	275
40	1599	75183	7835	388.3	42	347
50	2499	113770	12295	471.9	52	427
60	3599	188250	17755	565.4	61	508

5.1.1.2.3 Análise dos Resultados

Para as redes com disposição irregular de nós, dependendo do método, ocorreu um acréscimo médio no tempo computacional requerido de 62 a 185% quando comparado com as redes que tiveram seus nós regularmente dispostos. O aumento expressivo do

tempo de resolução observado para os métodos de Gauss e Cholesky, reflete o efeito do 'preenchimento' das matrizes, uma vez que para os sistemas resultantes de redes com disposição regular de nós esse efeito não é muito significativo.

Os métodos com pré-condicionadores diminuíram o número de iterações necessárias para se chegar à solução do problema. Essa redução foi sensivelmente maior no método GCPC abatendo em até, aproximadamente, 90% o número de passos requeridos, quando comparado ao método GC. O método GCPD apresentou uma melhora menor, em torno de 10%.

Na prática, os sistemas de distribuição não se caracterizam por uma estruturação de nós nem ideal, como nas redes com disposição regular de malha, nem caótica, como nas malhas irregulares. Portanto, o comportamento computacional da maioria das redes reais deve estar situado em um ponto intermediário entre os dois tipos de disposição de nós estudadas.

Fazendo-se uma média entre os pontos de interseção esperados para a definição da eficiência computacional das redes, considerando os dois tipos de malha, pode-se constatar que para sistemas de distribuição de água de pequeno porte, com até aproximadamente 40 nós de consumo, o método mais eficiente será a Eliminação de Gauss. Em redes de médio porte, com número de nós entre 40 e 800, recomenda-se utilizar o método de Fatorização de Cholesky, enquanto que para problemas de grande porte, com mais de 800 variáveis, o método que se mostrou mais adequado foi o Gradiente Conjugado Pré-condicionado Fatorização de Cholesky Incompleta.

Assim conclui-se que, para redes de médio e grande porte com acima de 40 variáveis, os métodos de Cholesky e GCPC apresentam-se os mais eficientes, o que se deve à concepção dos mesmos, uma vez que ambos foram desenvolvidos e se adaptam melhor a sistemas de equações baseados na matriz de Stieltjes.

Os sistemas estudados neste trabalho podem ser classificados como sendo de pequeno (Dois Anéis) e de médio porte (Bessa e Sistema RF1). Dessa forma, os métodos empregados para a solução das equações lineares foram Gauss, para o primeiro caso e Cholesky para os outros dois.

5.1.2 Método de Geração de Soluções Não Dominadas e Seus Operadores

Com a finalidade de definir o método multiobjetivo e os operadores a serem empregados, efetuou-se uma comparação de *dois* métodos cada qual considerando

três tipos de modelos de recombinação e dois de mutação, apresentados na seção 4.5, utilizando-se como base a rede “Dois Anéis”.

Os métodos avaliados foram o *NSGA-II* e o *SPEA*. Quanto aos operadores, foram analisados três tipos, *BLX- α* , *Naive* e *Uniforme*; enquanto que para a mutação verificou-se o comportamento dos operadores *randômico* e *não uniforme*. Para os operadores *BLX- α* , consideraram-se três diferentes probabilidades de recombinação (50%, 75% e 100%), enquanto que, para o operador *Uniforme*, foram empregadas duas probabilidades (25% e 50%). Assim, foram estudados ao todo doze combinações de operadores para cada método. O número de soluções iniciais e iterações foi tomado como 100 para todas combinações.

Para cada combinação, *recombinação-mutação*, foram geradas dez frentes não-dominadas utilizando-se dos métodos *NSGAI*, e *SPEA* e considerando-se 2, 3 e 4 objetivos.

Na geração das fronteiras não dominadas foi empregada a biblioteca *MOMHLib++* para *C++*, desenvolvida por Jaskiewicz (2001), com algumas modificações implementadas de modo a se realizar o cálculo das métricas de desempenho “*C*” e “*S*”. A codificação das combinações adotadas neste trabalho, para cada método é apresentada na Tabela 5.13.

Tabela 5.13 - Codificação das combinações empregadas na análise do método multiobjetivo

Representação	Recombinação	Mutação
1	BLX- α 50%	Randômico
2	BLX- α 75%	Randômico
3	BLX- α 100%	Randômico
4	Naive	Randômico
5	Uniforme 25%	Randômico
6	Uniforme 50%	Randômico
7	BLX- α 50%	Não Uniforme
8	BLX- α 75%	Não Uniforme
9	BLX- α 100%	Não Uniforme
10	Naive	Não Uniforme
11	Uniforme 25%	Não Uniforme
12	Uniforme 50%	Não Uniforme

Após a geração das frentes foram efetuadas comparações entre as diferentes combinações. Estas checagens avaliaram dois conjuntos não dominados, escolhidos aleatoriamente entre os 10 gerados para cada combinação. Para cada par de métodos confrontados, foram feitas 30 comparações, em que os resultados da Métrica *C*, para os métodos *NSGAI* e *SPEA* são apresentados na Figura 5.5 e na Figura 5.6

respectivamente. Os valores médios da Métrica C para os métodos NSGAI e SPEA, considerando 2, 3 e 4 objetivos são apresentados da Tabela A.1 a Tabela A.6 (Anexo I).

A Figura A.1 (Anexo I) mostra o gráfico *boxplot* obtido para a Métrica S na iteração 100, considerando 2, 3 e 4 objetivos empregando o método NSGAI. Para o SPEA, os resultados da métrica S são mostrados na Figura A.2 (Anexo I) Para a métrica *espaçamento* os resultados encontrados para os métodos considerando diferentes configurações podem ser visualizados nas Figuras A.3 e A.4 (Anexo I).

Uma das desvantagens em se trabalhar com a Métrica C é a permanente necessidade de uma segunda frente para efetuar comparação, o que não ocorre com a Métrica S. Com isso, é possível se fazer uma verificação da evolução dos valores dessa medida ao longo das iterações. Nas Figuras A.5 a A.10 (Anexo I) são apresentadas as evoluções de valores encontrados para a Métrica S ao longo do processo de geração da frente Pareto.

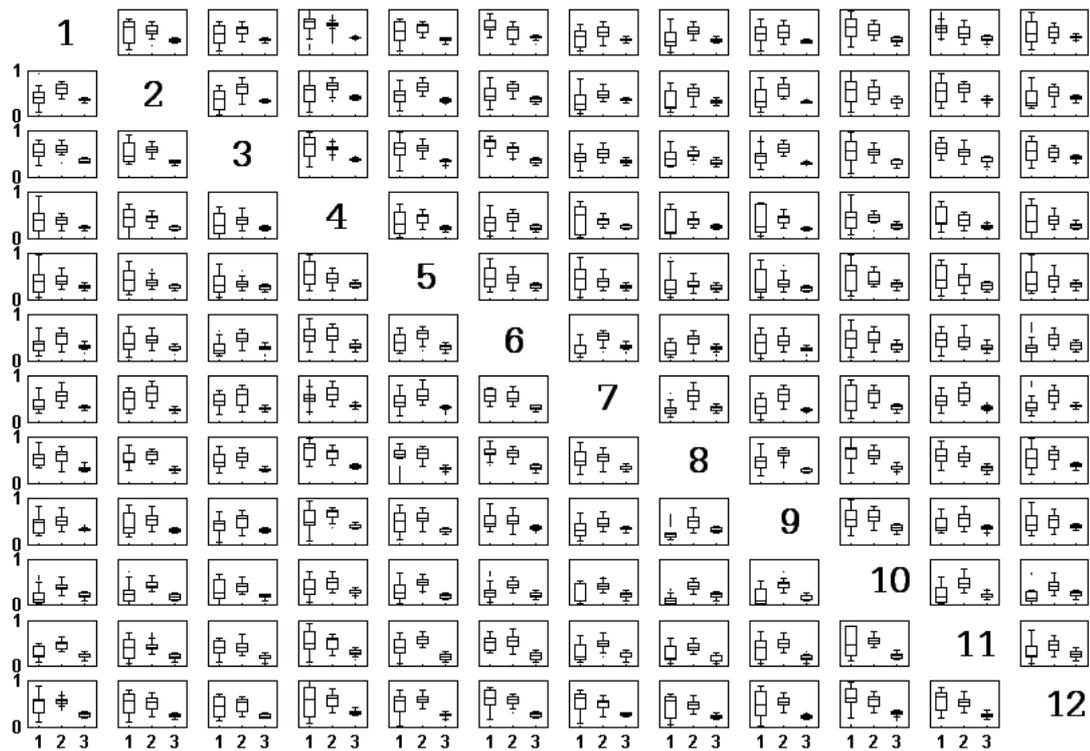


Figura 5.5 – Gráfico Boxplot dos valores da Métrica $C(A,B)^2$ para as diferentes configurações do método NSGAI, considerando 2, 3 e 4 objetivos³.

² As soluções A e B se referem a duas soluções na *linha A e coluna B*, respectivamente.

³ Os valores 1, 2 e 3 no gráfico representam respectivamente o número de objetivos 2, 3 e 4.

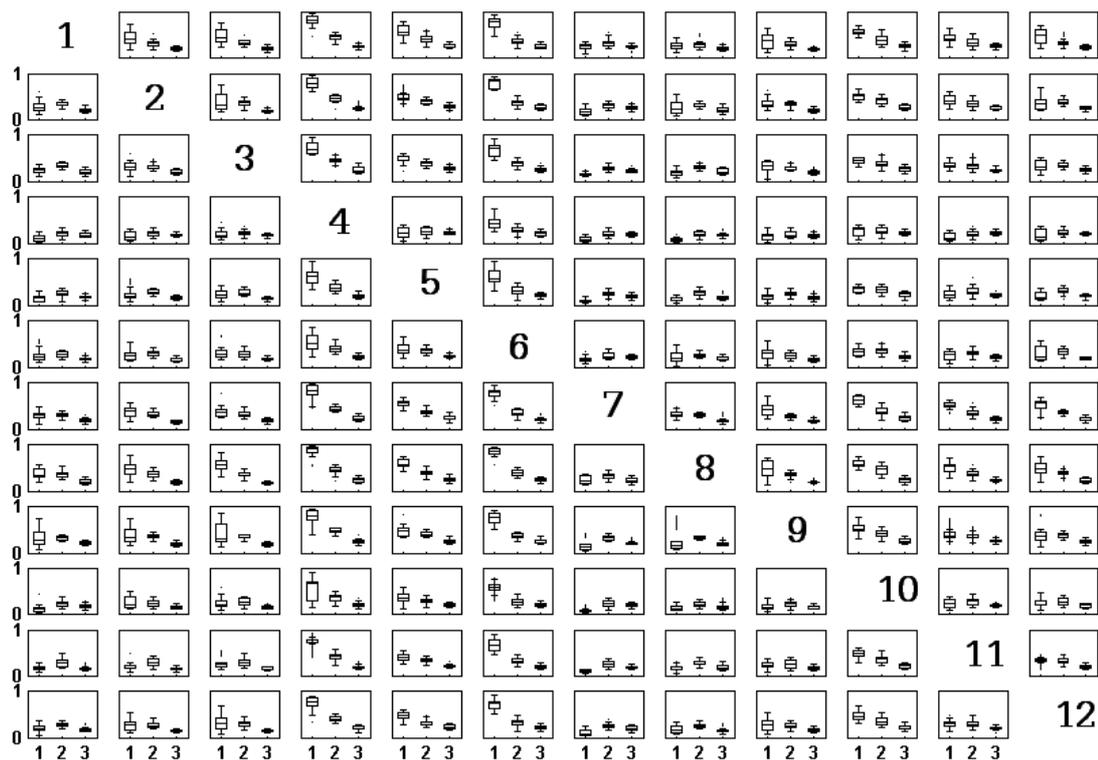


Figura 5.6 - Gráfico Boxplot dos valores da Métrica $C(A,B)$ para as diferentes configurações do método SPEA, considerando 2, 3 e 4 objetivos.

5.1.2.1- Análise dos Resultados

Para os valores da Métrica C , verifica-se, nas combinações que possuem operadores de recombinação BLX- α , a ocorrência de melhores resultados que para os encontrados para os operadores Naive e Uniforme (Tabelas A.1 a A.6). Com relação ao operador de mutação e a taxa de recombinação empregada para o operador BLX- α , não houve uma diferença tão significativa quanto aquela observada para os outros tipos de *crossovers* analisados. No entanto, as configurações do tipo 8 (BLX- α 75% Não Uniforme) apresentaram os melhores valores médios para Métrica C na maioria dos casos, considerando os dois métodos empregados, a exceção se deu para as análises com quatro objetivos, quando o operador de mutação randômico apresentarem melhores resultados (Tabelas A.1 a A.6).

Ainda com relação à Métrica C , observa-se que, há uma tendência em diminuir a capacidade de um conjunto de soluções dominar outro, ao passo que o número de objetivos aumenta (Figura 5.5 e Figura 5.6). Isso ocorre em virtude do aumento da quantidade de elementos da frente Pareto, que cresce com o incremento de objetivos avaliados, sem que haja aumento na quantidade soluções testadas, ou

seja, o número de indivíduos das populações e o número de iterações permaneceram constantes.

Com base nos resultados da Métrica S , verifica-se que os operadores de recombinação do tipo $BLX-\alpha$, apresentam melhores valores que os demais, na maioria das simulações (Figuras A.1 e A.2). Para os operadores de mutação, nos problemas com *dois* e *três* objetivos, o randômico apresenta resultado superior, enquanto que nos casos que envolveram *quatro* objetivos, o operador Não Uniforme mostrou-se mais eficaz. No tocante às metodologias empregadas, observa-se que o método NSGAI apresentou resultados superiores ao SPEA para todas as configurações analisadas (Figuras A.5 e A.10).

Analisando-se a evolução da frente não dominada (Figuras A.5 e A.10), verifica-se que aproximadamente 95% do crescimento da Métrica S ocorre até a iteração 50, enquanto que nas iterações restantes, ocorre em média uma melhora de apenas 5%, em relação aos valores encontrados na primeira iteração.

Com respeito à medida do *Espaçamento* entre as soluções, verifica-se que as combinações que têm o operador de recombinação $BLX-\alpha$, mostram valores dessa métrica pouco menores que os demais *crossovers*, quando se considera as soluções obtidas pelo método NSGAI (Figuras A.3 e A.4). Para os resultados obtidos através do método SPEA, não se verifica nenhuma primazia de um operador sobre outro, sendo os resultados de todas as configurações, considerando *dois*, *três* e *quatro* objetivos, inconclusivos. Do ponto de vista dos métodos, o SPEA mostrou melhores valores para o *Espaçamento* quando se trabalhou com dois objetivos, enquanto que o NSGAI foi melhor para as demais situações. A análise das métricas das soluções não dominadas indicou que o operador de recombinação $BLX-\alpha$, apresentou melhores resultados do que o *Naive* e *Uniforme*.

Com o intuito de fazer uma comparação direta entre os métodos de geração da frente Pareto, efetuou-se o cálculo da Métrica C entre as soluções geradas pelos métodos NSGAI e SPEA que empregaram operador de recombinação $BLX-\alpha$. Os resultados desse procedimento são apresentados na Figura 5.7, onde se verifica que o método NSGAI mostrou-se superior ao SPEA para em todas as situações.

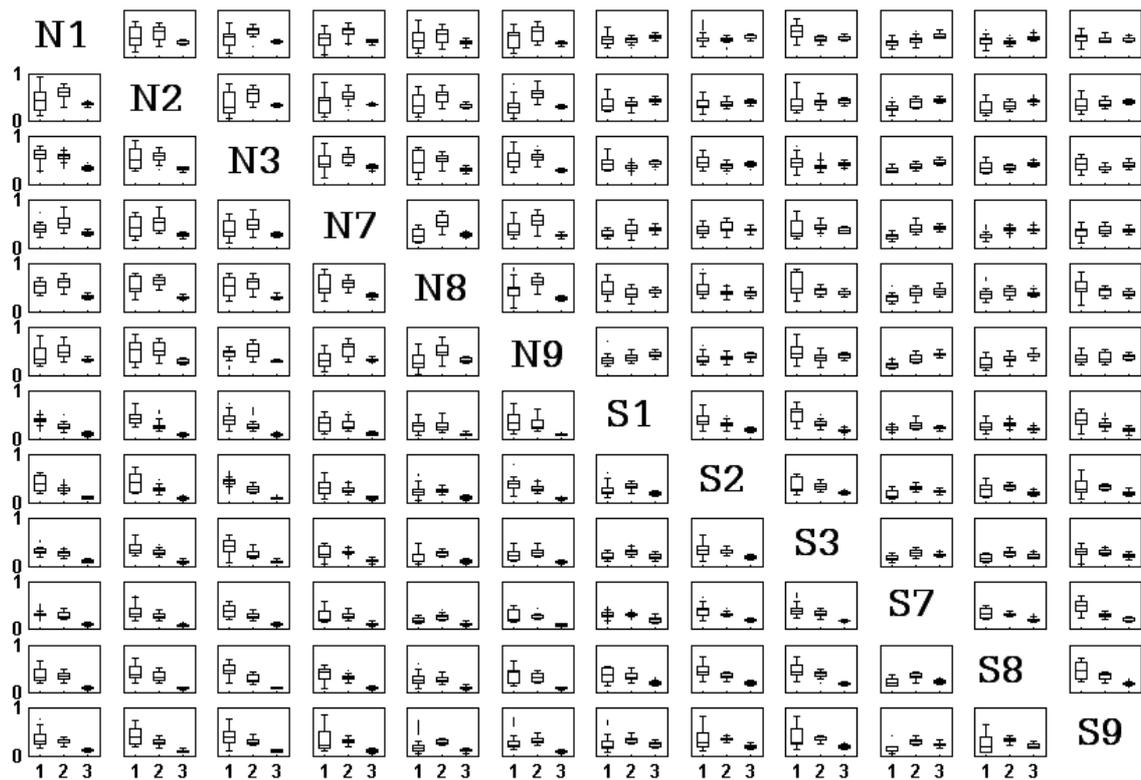


Figura 5.7 - Gráfico Boxplot dos valores da Métrica $C(A,B)$ para as diferentes configurações dos método NSGAII e SPEA, considerando 2, 3 e 4 objetivos.

Considerando os resultados obtidos para as diferentes métricas, escolheu-se o método NSGAII associado ao operador de mutação Randômico, e operador de recombinação BLX- α , com probabilidade de mutação igual a 75%, como o método de geração de frentes Pareto, a ser empregado no restante deste trabalho.

5.2 Rede Dois Anéis

A metodologia desenvolvida ao longo deste trabalho para o dimensionamento de sistemas de distribuição de água será aplicada a três configurações de redes, apresentadas no capítulo anterior.

Um dos objetivos do trabalho é definir quais as funções objetivo mais representativas do problema, sendo o foco principal voltado à definição da medida de confiabilidade que pode ser empregada com um certo nível de segurança como sendo representativa da capacidade do sistema funcionar em situações de falhas de componentes.

Uma das características da metodologia proposta é dividir o processo de escolha da alternativa mais adequada de solução para o problema em duas etapas. Na primeira são encontradas alternativas que têm por característica pertencer à frente

Pareto. Na segunda etapa é feita a escolha, baseada na opinião do decisor, de qual é a alternativa de maior compatibilidade. Considerando esses condicionantes, efetuou-se uma série de simulações com diferentes configurações de funções objetivo. Na Tabela 5.14 são apresentadas as funções objetivo consideradas em cada simulação.

Tabela 5.14 - Esquema das simulações efetuadas considerando diferentes funções objetivo

Simulação	Geração de Alternativas					Escolha da Alternativa		
	Função Objetivo							
	FO1	FO2	FO3	FO4	FO5	FO6	FO7	FO8
1	X	X	X	X				
2	X	X	X	X		X	X	
3 ¹	X	X						X
4	X	X			X			
5	X	X			X	X	X	
6 ²	X	X						X

¹ Considerando as alternativas obtidas na Simulação 1

² Considerando as alternativas obtidas na Simulação 4

Legenda:

FO1 - Custo FO3 - Entropia FO5 - Resilientropia FO7 - Envelhecimento
FO2 - Vazamento FO4 - Resiliencia FO6 - Expansibilidade FO8 - Tolerância

Do ponto de vista puramente teórico, a quantidade de simulações necessárias seria muito grande, cerca de 200, tirando assim a objetividade da análise. Dessa forma, a escolha para se fazer as simulação dos conjuntos de objetivos apresentados na Tabela 5.14 foi motivada, pela necessidade de se responder a algumas questões:

- As medidas indiretas de confiabilidade são representativas?
(Simulação 1 X Simulação 3 e Simulação 4 X Simulação 6)
- O acréscimo de outros objetivos, após a fase de geração das alternativas, modifica a solução final encontrada?
(Simulação 1 X Simulação 2 e Simulação 4 X Simulação 5)
- A resilientropia é uma medida eficiente para se medir a confiabilidade?
(Simulação 1 X Simulação 4)

Sucintamente, procura-se encontrar, por meio desta análise, a configurações com o menor número de objetivos que possa melhor extrair, principalmente no que diz respeito à confiabilidade, as características da rede de modo a subsidiar a tomada de decisão.

5.2.1 Geração das alternativas

Como resultado das análises efetuadas no item 5.1 deste capítulo, o modelo de geração de alternativas empregado será o *NSGAI*, utilizando o operador de mutação *Randômico* e o operador de recombinação *BLX- α* , com probabilidade de mutação igual a 75%. O método de análise hidráulica empregado será o *gradiente*, com a fatorização de *Gauss* para resolução dos sistemas de equações lineares, que é recomendado para redes de pequeno porte, como a Dois Anéis.

A curva da demanda ao longo do dia utilizada para as redes deste trabalho é apresentada na Figura 5.8. Essa curva, contendo quatro patamares de demanda, foi arbitrada e é utilizada apenas no cálculo dos vazamentos na rede. A determinação de todas as medidas de confiabilidade empregadas nesse trabalho foi considerada no cálculo para a demanda máxima.

As simulações propostas neste trabalho requerem a geração de dois conjuntos de soluções não dominadas (Simulações 1 e 4). O tamanho da população inicial adotado para a gerar cada um desses conjuntos foi 200 alternativas, enquanto que o número de iterações, ou gerações, foi tomado como sendo 500.

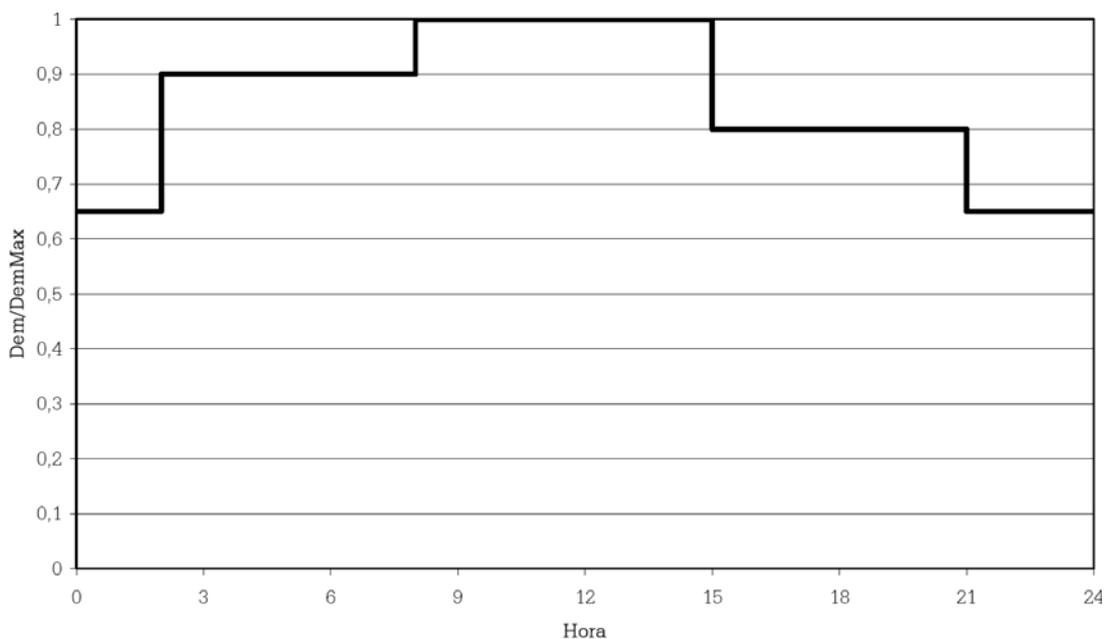


Figura 5.8 - Curva de demanda diária utilizada para a rede Dois Anéis

5.2.1.1 Geração de Alternativas para a Simulação 1

As alternativas geradas para o conjunto de objetivos da Simulação 1 são apresentados na Figura 5.9. Essa figura serve de referência para visualizar o relacionamento das alternativas geradas umas com as outras.

Conforme foi mencionado no Capítulo anterior, um outro objetivo, capacidade de atendimento, foi empregado, entretanto ele não será utilizado na análise, uma vez que apenas as soluções, que possuíam valores de CA iguais a 1 foram consideradas, descartando-se as alternativas restantes. Foram obtidas ao todo 5.937 soluções para serem analisadas. Como demandaria muito espaço, a colocação dos dados em meio impresso, optou-se por deixá-los disponíveis em meio digital, no CD anexo a esse trabalho. Assim, a tabela completa com o conjunto de soluções não dominadas utilizado para geração da Figura 5.9, encontra-se no CD Anexo (\Dois Aneis.\Resultado da Rede Dois Aneis.xls). Um resumo dos valores das funções objetivo das alternativas encontradas é apresentado na Tabela 5.15. O comportamento do conjunto de alternativas segundo a métrica S , é apresentado na Figura 5.10.

O tempo gasto para encontrar o conjunto de soluções foi de 1.952s (32min32s), o que implica num tempo médio gasto por solução de 0,019s, empregando-se um computador Pentium 4 com 2.4GHz.

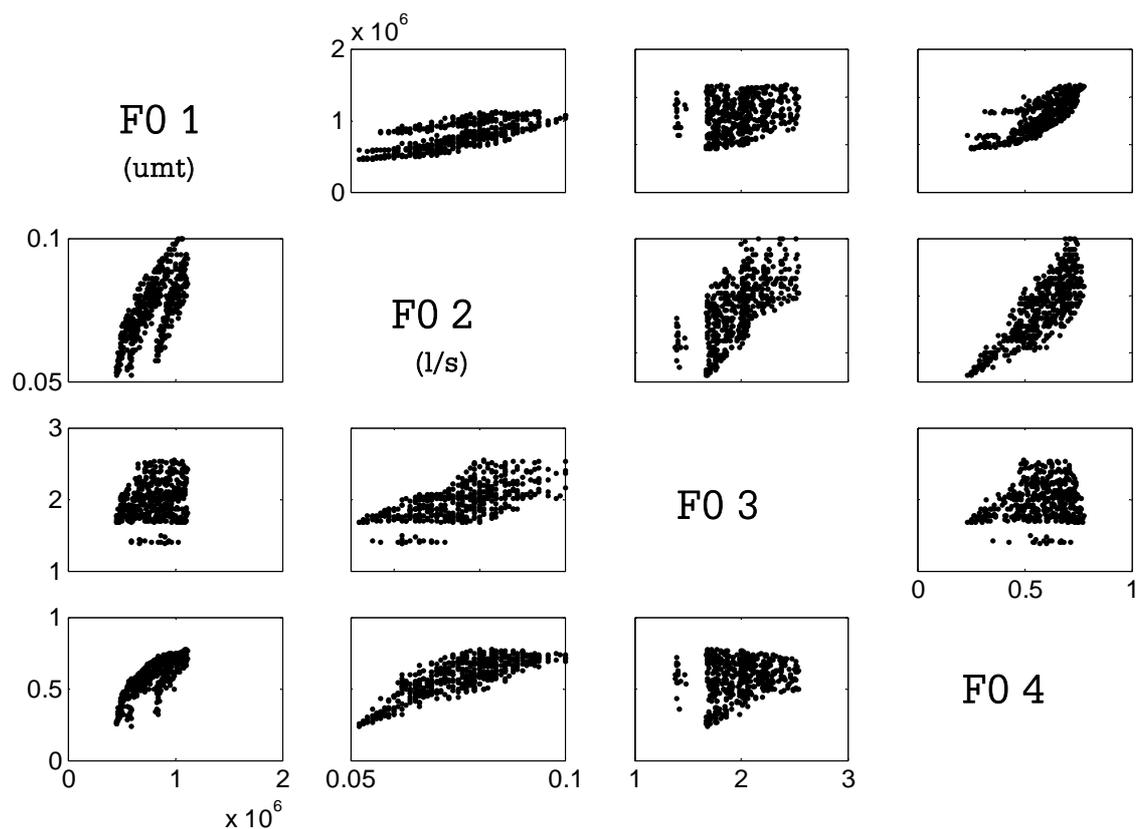


Figura 5.9 - Scatter-matrix do conjunto de soluções não dominadas gerado a partir de um conjunto inicial de 200 indivíduos após 500 gerações para o problema da rede Dois Anéis, considerando os objetivos da Simulação 1

Tabela 5.15 - Resumo dos valores das funções objetivo para as soluções geradas considerando os objetivos da Simulação 1 da rede Dois Anéis

	FO1 (UMT)	FO2 (l/s)	FO3	FO4
Mínimo	450,000	0.052	1.381	0.236
Máximo	1,115,000	0.105	2.543	0.776
Amplitude	665,000	0.054	1.162	0.540
Ampl/Mínimo	1.48	1.031	0.842	2.290

Verifica-se na Figura 5.9 que a tendência de crescimento das funções custo, vazamento e resiliência é aproximadamente exponencial. No entanto, para a relação entre as funções vazamento e resiliência, a relação exponencial é mais fraca, tendendo a ser quase linear. Tal fato deve-se à similaridade das formulações das duas funções, vazamento e resiliência, que têm como principal variável a pressão nos nós, onde a resiliência varia linearmente com a pressão no nó e o vazamento é uma função potencial, com expoente pequeno (1,18), para essa variável, o que deixa transparecer, visualmente, uma tendência próxima da linear.

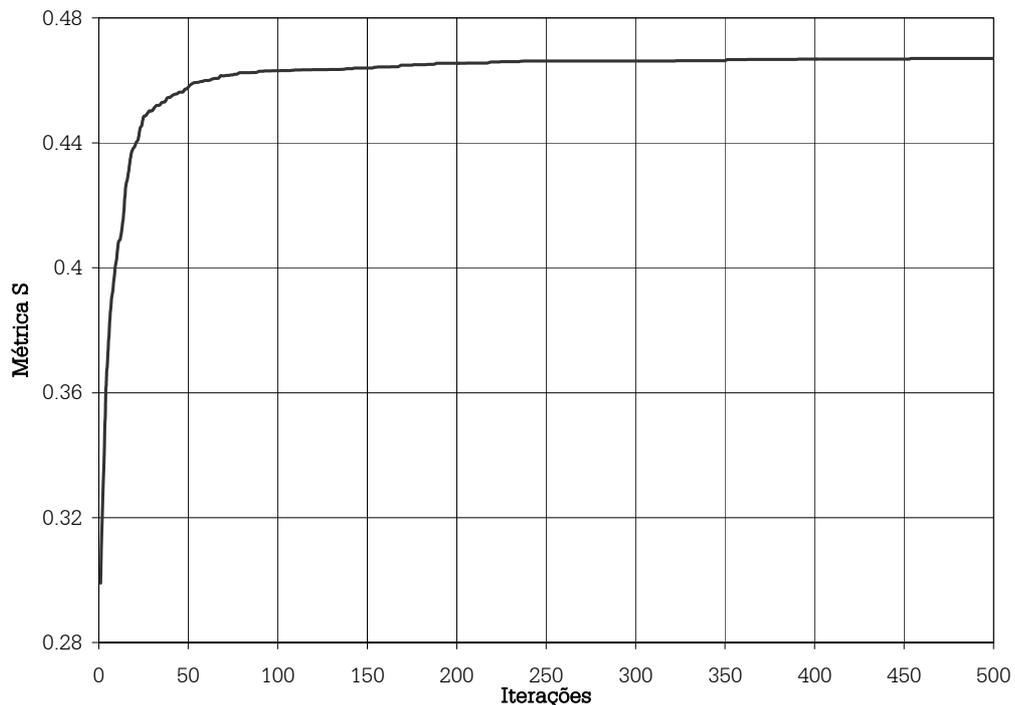


Figura 5.10 - Evolução dos valores da Métrica S para as soluções geradas considerando os objetivos da Simulação 1 da rede Dois Anéis

De acordo com a Figura 5.10, a fronteira não-dominada atingiu a sua forma final em torno da 200ª iteração. Sendo que o crescimento foi mais expressivo nas primeiras 50 gerações.

Outra característica observada é a quantidade de alternativas encontradas, 5.937, dificulta o tratamento dos dados, uma vez que as matrizes dos modelos multicriteriais terão dimensões muito elevadas, aproximadamente 36 milhões de elementos. fazendo a análise trabalhosa mesmo para modelos como o ELECTRE em que o tipo de cálculo é relativamente simples. Esse número elevado de soluções deve-se à quantidade de objetivos com que se está trabalhando, e principalmente, à função entropia, que por apresentar pouca correlação com as demais, permite que um grande número de alternativas seja encontrado. Para se contornar essa dificuldade, aplicou-se um procedimento de corte, semelhante ao empregado pelo SPEA de modo a diminuir o número de alternativas a serem trabalhadas, mantendo, entretanto, as características da frente Pareto.

Das funções objetivo avaliadas a que apresenta a maior variação em termos percentuais é o custo (FO1), seguido do vazamento (FO2) e entropia (FO3) a resiliência (FO4) foi a que apresentou menor variação, 84%, entre o maior e o menor valor. De um modo geral, é desejável que haja diferenças nítidas entre os valores das funções para as alternativas, pois caso contrário, a tomada de decisão tenderá a ser mais difícil.

A solução de menor custo encontrada foi 7,4% superior aos menores valores encontrados na literatura e que consideram cada trecho com um diâmetro constante que foi de 419.000 UMT (SAVIC e WALTERS, 1997; CUNHA E SOUZA, 1999). Esse acréscimo se deve principalmente ao incremento da vazão necessária para o abastecimento, ocorrido em virtude dos vazamentos que representou cerca de 9% da demanda máxima, para a situação de menor custo.

5.2.1.2 Geração de Alternativas para a Simulação 4

As alternativas geradas na Simulação 4 foram obtidas considerando três funções objetivos: custo (FO1), vazamento (FO2) e resiliência (FO3). A distribuição dos valores das funções para as diferentes alternativas pode ser visualizado na Figura 5.11. O número de soluções não dominadas obtido considerando essa configuração foi de 238. Como no caso anterior, o conjunto de alternativas utilizada na construção da Figura 5.11 é disponibilizado no CD Anexo (\Dois Aneis.\Resultado da Rede Dois Aneis.xls). Um resumo dos valores das funções objetivo das soluções não dominadas é apresentado na Tabela 5.16. A Figura 5.12 mostra o acompanhamento dos valores da métrica S ao longo das gerações.

O tempo computacional necessário para se chegar à frente, foi de 1.892s, resultando em uma média de 0,0189s por alternativa analisada. Essa diferença pode ser

consequência da menor quantidade de casos a serem comparados. No entanto, a pequena variação observada evidencia que a maior demanda computacional desse tipo de problema se concentra, mesmo no caso de uma rede de pequeno porte, no modelo hidráulico de avaliação das alternativas, e não na comparação das mesmas, que é feita no modelo de geração da fronteira Pareto.

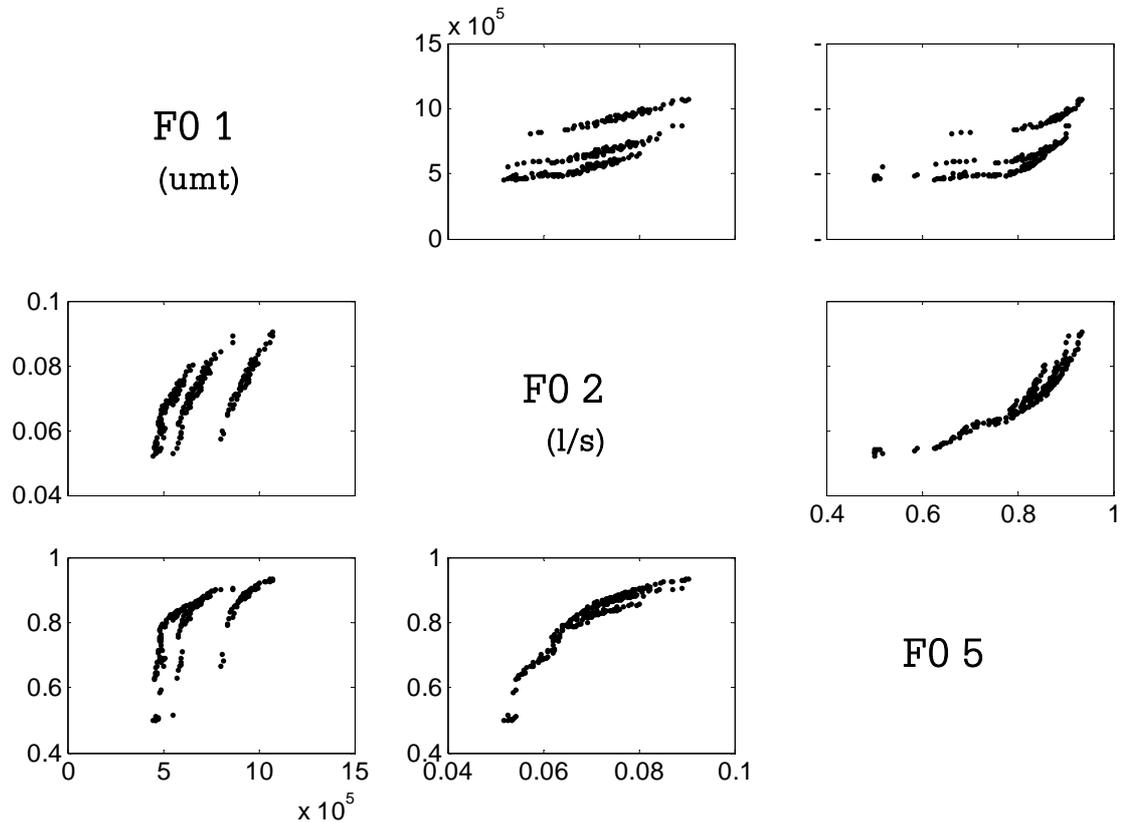


Figura 5.11 - Scatter-matrix do conjunto de soluções não dominadas gerados a partir de um conjunto inicial de 200 indivíduos após 500 gerações para o problema da rede Dois Anéis, considerando os objetivos da Simulação 4

Tabela 5.16 - Resumo dos valores das funções objetivo para as soluções geradas considerando os objetivos da Simulação 4 da rede Dois Anéis

	FO1 (UMT)	FO2 (l/s)	FO5
Mínimo	450,000	0.052	0.501
Máximo	1,070,000	0.090	0.934
Amplitude	620,000	0.038	0.434
Ampl/Minimo	1.38	0.740	0.867

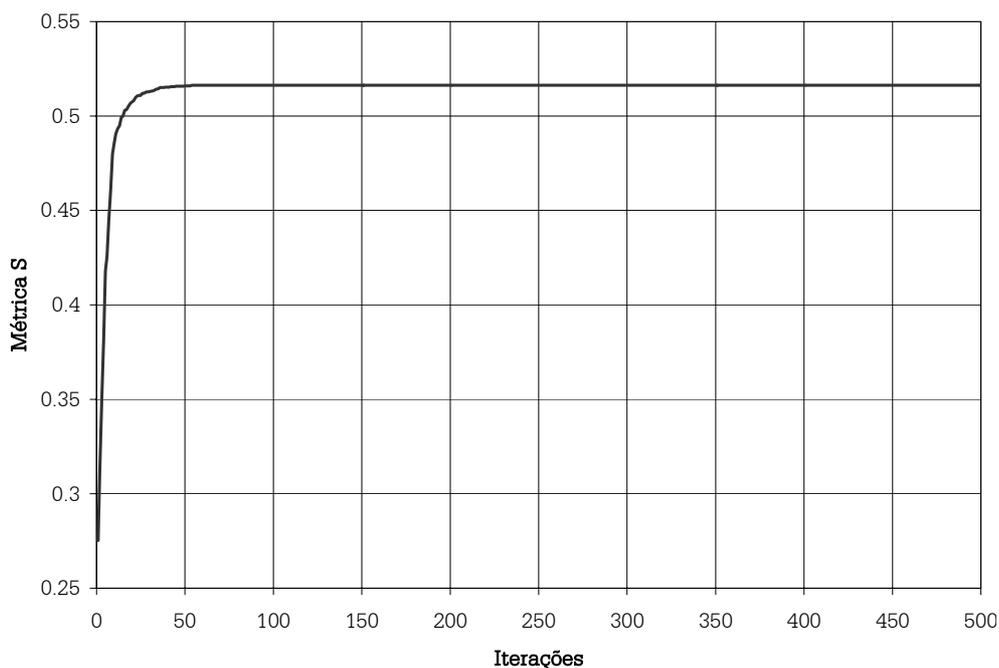


Figura 5.12 - Evolução dos valores da Métrica S para as soluções geradas considerando os objetivos da Simulação 4 da rede Dois Anéis

No tocante a evolução da frente Pareto ao longo das iterações, verifica-se na Figura 5.12 que a região não dominada já está praticamente estabelecida na iteração 50, denotando uma necessidade menor de gerações para se chegar à fronteira final que a necessária na Simulação 1. Ademais, a solução de menor custo foi a mesma, para as duas simulações, esse parâmetro é importante de se considerar, visto que é um ponto comum que existe em todos os casos proposto neste trabalho, e a indicação de que o mesmo valor foi encontrado significa que o método foi capaz de cobrir bem a região não dominada, incluindo um ponto de extremo, a solução de mínimo custo, que é difícil de se encontrar.

5.2.1.3 Cálculo das Funções Objetivo das Simulações 2 e 3

Os valores das funções objetivos complementares que servem como medida alternativa da confiabilidade das alternativas geradas para a Simulação 1, – *efeito do envelhecimento (FO6)*, *expansibilidade (FO7)* e *tolerância (FO8)* – foram calculados empregando a metodologia proposta no capítulo anterior. Para o cálculo das funções objetivo FO6 e FO7, foi executada, para cada caso, apenas uma análise hidráulica extra. Porém, no cálculo da função tolerância, foi necessário analisar um total de 37 cenários extras, que representam as possíveis situações de quebra.

Um resumo dos resultados obtidos é apresentado na Tabela 5.17, os resultados completos podem ser encontrados no CD Anexo (\Dois Aneis.\Resultado da

Rede Dois Aneis.xls). Na Tabela 5.18 são apresentados os valores dos coeficientes de correlação das funções objetivo relacionadas à confiabilidade empregadas nas Simulações 1, 2 e 3 que representam a confiabilidade do sistema. A Figura 5.13 mostra a distribuição das alternativas segundo as funções objetivo utilizadas nas Simulações 1, 2 e 3.

Tabela 5.17 - Resumo dos valores das funções objetivo para as soluções geradas considerando os objetivos das Simulações 1, 2 e 3 da rede Dois Anéis

	FO1 (UMT)	FO2 (l/s)	FO3	FO4	FO6	FO7	FO8
Mínimo	450,000	0.052	1.381	0.236	0.864	0.915	0.769
Máximo	1,115,000	0.105	2.543	0.776	1.000	1.000	0.932
Amplitude	665,000	0.054	1.162	0.540	0.136	0.085	0.163
Ampl/Mínimo	1.478	1.031	0.842	2.290	0.157	0.093	0.212

As funções que procuram retratar diretamente a confiabilidade apresentam pequenas amplitudes (SHINSTINE, AHMED e LANSEY, 2002). Nas soluções encontradas para as Simulações 2 e 3, o valor da confiabilidade, considerando a medida estudada no capítulo anterior varia entre 0,99959 e 0,99991, o que implica em uma amplitude relativa de apenas 0,00032. Assim, ao se adotar a tolerância como medida da confiabilidade está-se permitindo que haja uma melhor diferenciação entre as alternativas, uma vez que esta apresentou uma amplitude relativa de aproximadamente 0,212, que embora seja ainda um valor menor que o apresentado por medidas como medidas custo e vazamento, é superior às outras métricas, envelhecimento e expansividade, que tiveram valores calculados para a amplitude relativa de 0,093 e 0,157 respectivamente (Tabela 5.17).

Tabela 5.18 - Coeficiente de correlação entre as funções objetivo relacionadas à confiabilidade das soluções geradas considerando os objetivos das Simulações 1, 2 e 3 para a rede Dois Anéis

	FO3	FO4	FO6	FO7	FO8
FO3	1	0.182	0.104	0.081	0.254
FO4	0.182	1	0.966	0.928	0.663
FO6	0.104	0.966	1	0.979	0.631
FO7	0.081	0.928	0.979	1	0.603
FO8	0.254	0.663	0.631	0.603	1

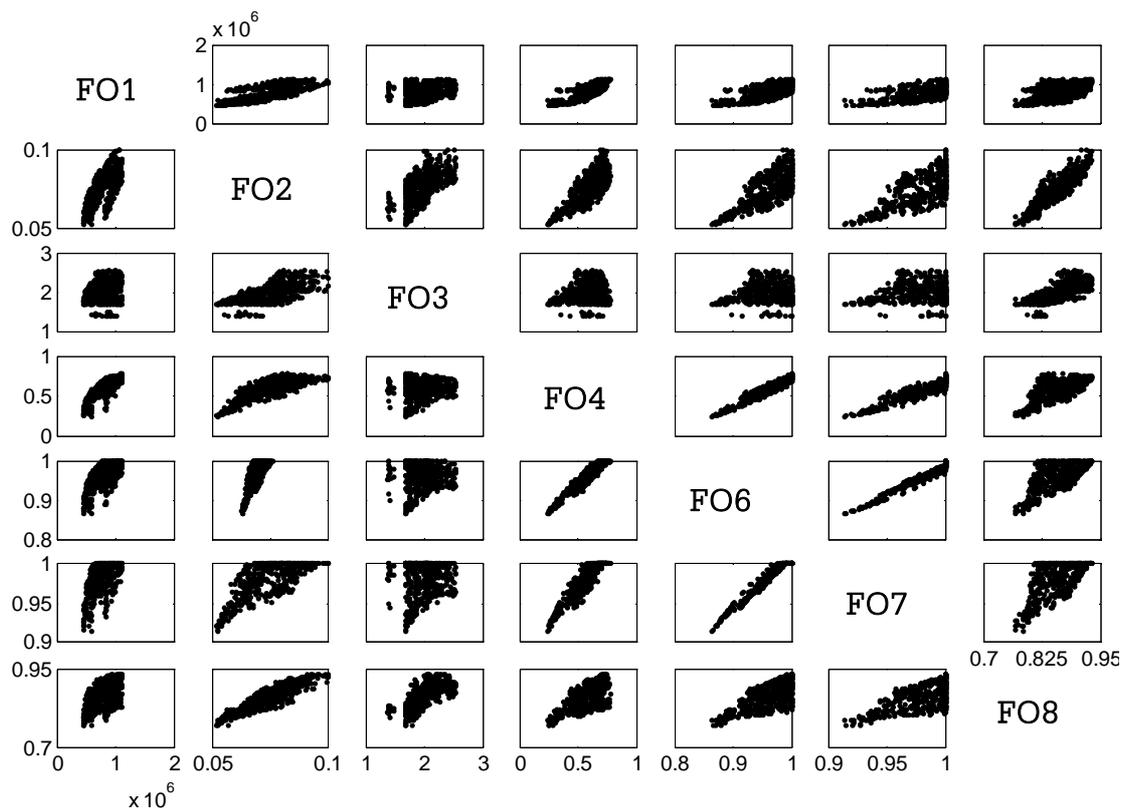


Figura 5.13 - Scatter-matrix dos valores das funções objetivo para as soluções geradas considerando os objetivos das Simulações 1, 2 e 3 da rede Dois Anéis

As funções que representam a confiabilidade do sistema apresentaram valores de correlação relativamente baixos, exceção feita às formulações que tratam indiretamente a confiabilidade por meio de medidas de pressão – resiliência (FO4), envelhecimento (FO6) e expansividade (FO7) – que propiciaram valores de correlação elevados, o que se deve basicamente à forma de construção das mesmas. No entanto, os valores de correlação destas funções com a entropia, foram os que mostraram pior correlação (Tabela 5.18), não apresentando ainda uma boa ligação com os valores calculados para tolerância.

Condizendo ainda com os resultados da correlação (Tabela 5.18), as funções FO4, FO6 e FO7 podem ser relacionadas de modo linear, como pode ser observado na Figura 5.13

5.2.1.4 Cálculo das Funções Objetivo das Simulações 5 e 6

Os valores das funções complementares, utilizadas nas Simulações 5 e 6, foram obtidos de modo idêntico ao descrito no item anterior. Um resumo dos resultados obtidos é apresentado na Tabela 5.19 enquanto que os dados completos podem ser obtidos no CD Anexo (\Dois Aneis.\Resultado da Rede Dois Aneis.xls). Os

valores das correlações entre as funções objetivos empregadas nas Simulações 5 e 6 são mostrados na Tabela 5.20, enquanto que a visualização das soluções geradas segundo os diferentes objetivos pode ser feita na Figura 5.14.

Tabela 5.19 - Resumo dos valores das funções objetivo para as soluções geradas considerando os objetivos das Simulações 4, 5 e 6 da rede Dois Anéis

	FO1 (UMT)	FO2 (l/s)	FO5	FO6	FO7	FO8
Mínimo	450,000	0.052	0.501	0.865	0.916	0.769
Máximo	1,070,000	0.090	0.934	1.000	1.000	0.925
Amplitude	620,000	0.038	0.434	0.135	0.084	0.156
Ampl/Mínimo	1.38	0.740	0.867	0.156	0.092	0.203

Tabela 5.20 - Coeficiente de correlação entre as diversas funções objetivo das soluções geradas considerando os objetivos das Simulações 4, 5 e 6 para a rede Dois Anéis

	FO5	FO6	FO7	FO8
FO5	1	0.899	0.877	0.946
FO6	0.899	1	0.986	0.947
FO7	0.877	0.986	1	0.932
FO8	0.946	0.947	0.932	1

Os valores máximos e mínimos encontrados para as funções objetivo comuns, foram semelhantes aos obtidos no item anterior (Tabela 5.19). Com relação aos valores de correlação das funções relacionadas à confiabilidade, verifica-se que a função FO8 passou a apresentar valores do coeficiente de correlação muito superiores aos observados no item anterior, conforme pode ser verificado na Tabela 5.18 e Tabela 5.20. Ademais, as alternativas mostraram comportamento semelhante ao encontrado nas soluções geradas pela Simulação 1, em que as funções FO5, FO6 e FO7, apresentam comportamento quase linear.

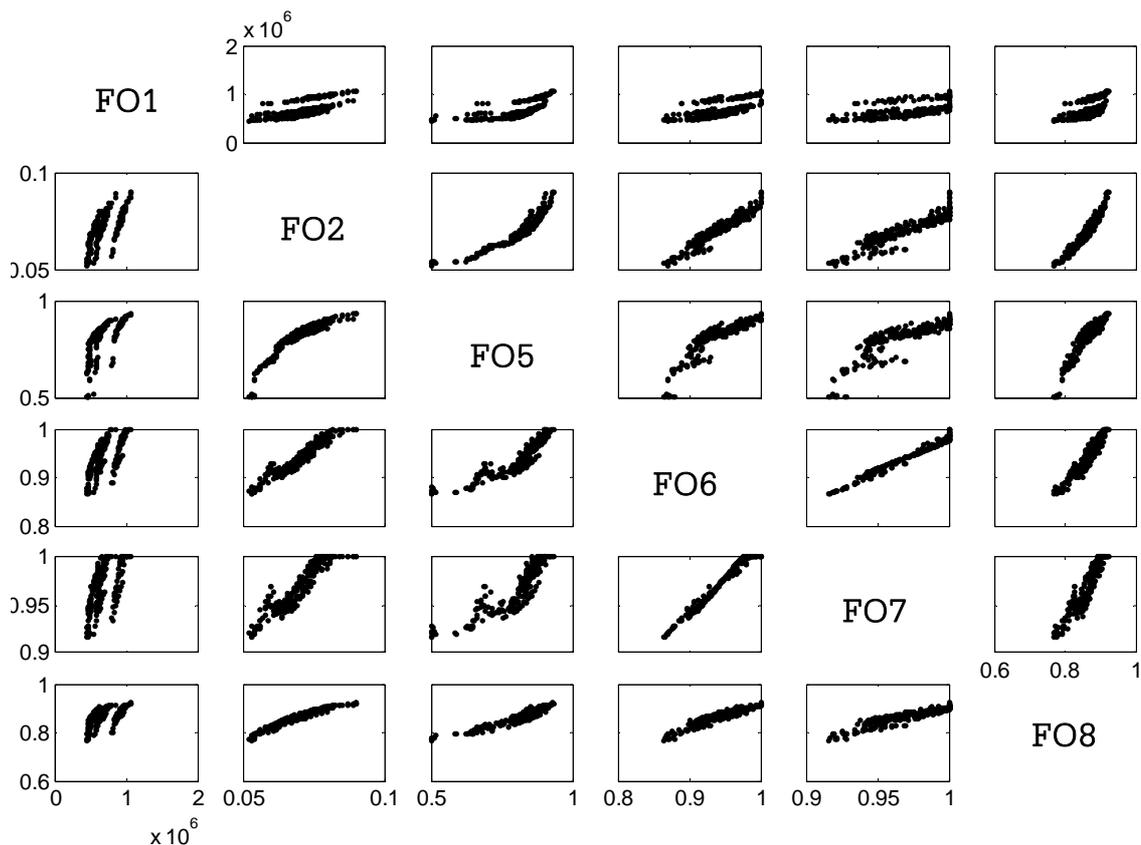


Figura 5.14 - Scatter-matrix dos valores das funções objetivo para as soluções geradas considerando os objetivos das Simulações 4, 5 e 6 da rede Dois Anéis

5.2.2 - Ordenação das Alternativas

Para se fazer o ordenamento das alternativas segundo a preferência do decisor, foram empregados dois métodos. ELECTRE III e PROMETHEE, que tiveram os seus procedimentos descritos no Capítulo III. Um dos principais pontos para a aplicação dos métodos multicriteriais diz respeito à definição dos parâmetros que serão usados, que procuram indicar o comportamento do tomador de decisão quando posto de frente à duas alternativas. Para cada objetivo, devem-se definir *quatro* parâmetros para o método ELECTRE III (indiferença, preferência, veto e peso) e *três* para o PROMETHEE (indiferença, preferência e peso), sendo que neste, é necessário também definir também uma *função de preferência*. De modo a se empregar os mesmos índices nos dois métodos, bem como se ter funções “fuzzy” semelhantes para determinação dos graus de preferência do decisor, optou-se por utilizar a *função linear 5* (Figura 3.14).

Para aplicação dos algoritmos multicriteriais, na qualidade de decisor, foram consideradas algumas premissas na definição dos parâmetros do modelo, a saber:

- os valores de indiferença (q) entre dois objetivos comparados foi tomado como 5%;

- os valores de preferência estrita de um objetivo sobre outro (p) foi considerado com sendo igual a 20%;
- o valor do veto (v) foi adotado como sendo de 50%.

Como os valores encontrados para as funções objetivo apresentam diversos níveis de variação, havendo funções que possuem uma amplitude de duas vezes o valor do seu mínimo (F01), enquanto que outras não ultrapassam 10% desse valor (FO6), o emprego direto da faixa de valores acima mostrado, implicaria em que para alguns objetivos praticamente a maioria das soluções seriam indiferentes entre si. Assim, optou-se por associar esse critério à amplitude relativa observada para as funções, de modo a se assegurar uma diferenciação esperada para as diferentes alternativas, em todos os aspectos analisados. Assim, para o método ELECTRE III, considerando a minimização dos objetivos, os limites de indiferença, preferência estrita e veto seriam dados por:

$$a_1 I a_2 \quad Z_k(a_1) - Z_k(a_2) < 0,05 \varpi_k Z_k(a_1) \quad (5.2)$$

$$a_1 Q a_2 \quad 0,05 \varpi_k Z_k(a_1) \leq Z_k(a_1) - Z_k(a_2) \leq 0,20 \varpi_k Z_k(a_1) \quad (5.3)$$

$$a_1 P a_2 \quad Z_k(a_1) - Z_k(a_2) \geq 0,20 \varpi_k Z_k(a_1) \quad (5.4)$$

$$a_1 V a_2 \quad Z_k(a_1) - Z_k(a_2) \geq 0,50 \varpi_k Z_k(a_1) \quad (5.5)$$

em que ϖ_k é a amplitude relativa do objetivo k .

Para o PROMETHEE as equações são idênticas com exceção do veto (Eq. 5.5), já que esta metodologia não incorpora essa característica.

Após a determinação dos níveis de indiferença, preferência e veto dos métodos foi definido qual será o peso para cada objetivo. A premissa empregada na definição dos pesos do problema foi de que o conjunto de objetivos deve ter o mesmo peso no processo. Assim poder-se-ia considerar que Custo, Vazamento e Confiabilidade teriam a mesma importância. Entretanto, para redes que não possuem sistemas específicos para diminuição das pressões, como válvulas redutoras de pressão, os objetivos custo e vazamento são convergentes, uma vez que priorizam redes de diâmetros menores, que têm custos e cargas mais baixos. Dessa forma de modo a equilibrar a influência dos objetivos no processo, como decisor do processo, optou-se por conferir pesos iguais para o conjunto de objetivos Custo-Vazamento e Confiabilidade conforme observado na Tabela 5.21.

Tabela 5.21 - Pesos das funções objetivo empregadas nos métodos ELECTRE III e PROMETHEE para as diversas simulações da rede Dois Anéis

	FO1	FO2	FO3	FO4	FO5	FO6	FO7	FO8
Simulação 1	0,250	0,250	0,250	0,250	-	-	-	-
Simulação 2	0,250	0,250	0,125	0,125	-	0,125	0,125	-
Simulação 3	0,250	0,250	-	-	-	-	-	0,500
Simulação 4	0,250	0,250	-	-	0,500	-	-	-
Simulação 5	0,250	0,250	-	-	0,167	0,167	0,167	-
Simulação 6	0,250	0,250	-	-	-	-	-	0,500

Definidos os parâmetros dos métodos multicriteriais empregados, procede-se agora a aplicação dos mesmos aos conjuntos de alternativas obtidos no item 5.2.1.

5.2.2.1 Ordenação das alternativas das Simulações 1, 2 e 3

Os métodos ELECTRE III e PROMETHEE foram implementados em MATLAB 6.1. Os resultados encontrados para as alternativas localizadas nas dez primeiras colocações de preferência para cada Simulação, podem ser observados da Tabelas A.7 a A.12 (Anexo II).

Com base nas configurações melhor classificadas pelos métodos ELECTRE III e PROMETHEE para rede Dois Anéis, considerando os resultados das Simulações 1, 2 e 3, verifica-se que houve um incremento de 3,8% a 83 %, do valor do custo da rede quando se compara com a solução de mínimo custo, Alternativa 1 (Figura 5.15a), enquanto que para o vazamento houve um acréscimo de 9% a 66%.

A alternativa que mais apareceu listada da Tabela A.7 a Tabela A.12, foi a 228 (Figura 5.15b), que teve uma frequência de 3 vezes. Um total de 10 alternativas, apareceram entre as dez melhores classificadas em 2 oportunidades, enquanto que 37 só constaram apenas uma vez entre as seis classificações realizadas.

Pode-se constatar com base nas tabelas acima que, para as simulações efetuadas, não houve uma definição de padrões que poderiam ser identificados para a escolha da solução de maior compatibilidade. Essa falta de padrão pode ser atribuída principalmente à entropia que, por ter um comportamento imprevisível quando comparado com os outros objetivos, permitiu uma certa “diluição” dos resultados. Com base nesse aspecto, pode-se afirmar que o conjunto de funções objetivo que compõe a Simulações 1 não é capaz de representar globalmente o problema, uma vez que o mesmo padrão de escolha não pode ser observado nas demais simulações, principalmente na Simulação 3. O que pode ser constatado comparando-se as

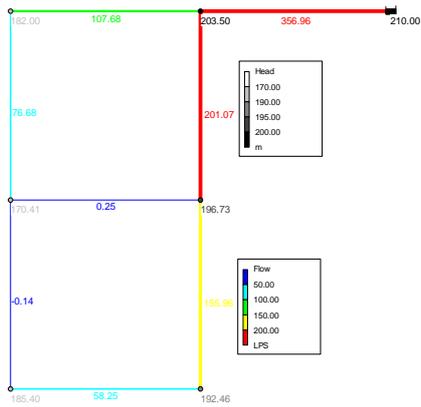
alternativas 238 (Figura 5.15c) e 143 (Figura 5.15d), que apresentaram a maior preferência, pelo método ELECTRE III, para as simulações 1 e 3, respectivamente.

Embora seja uma função não funcionou da forma esperada na geração de soluções eficientes do ponto de vista do custo e da confiabilidade, a entropia exerceu o seu papel de procurar distribuir o fluxo ao longo da rede, sem procurar caminhos preferenciais, o que pode ser evidenciado na solução com maior valor de entropia escolhida, alternativa 140 (Figura 5.15e), em que a distribuição de fluxo não apresentou caminhos preferenciais.

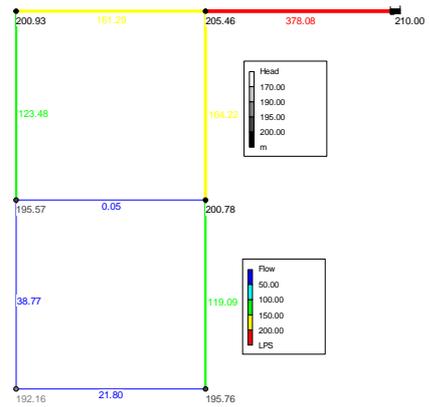
Considerando os métodos empregados, observa-se que os resultados obtidos pelo PROMETHEE, para as Simulações 1 e 2, quando comparados com o método ELECTRE III, apresentaram valores, em média, 20% menores tanto para a função *custo* (FO1) e 8,2% a função *vazamento* (FO2), enquanto que para a *tolerância* (FO8) essa diferença é de cerca de 2%. A ocorrência de valores próximos ao extremo inferior, por exemplo alternativa 10, pode ser creditada a ausência de uma função de veto, que impeça a escolha de soluções com valor indesejável, para alguma função objetivo, o que não ocorre no método ELECTRE.

Do ponto de vista hidráulico, as soluções também apresentaram comportamentos diferentes. Verificou-se a tendência, observada em processos de otimização apenas dos custos, de identificação de redes ramificadas.

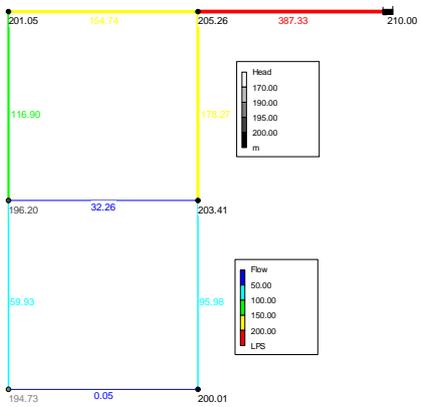
Constata-se ainda, que algumas soluções encontradas na Simulação 3, que representam a medida mais precisa para a confiabilidade utilizada neste trabalho, apresentaram uma tendência de terem diâmetros mínimos nos trechos (5, 7 ou 8), que caracteriza uma ramificação.



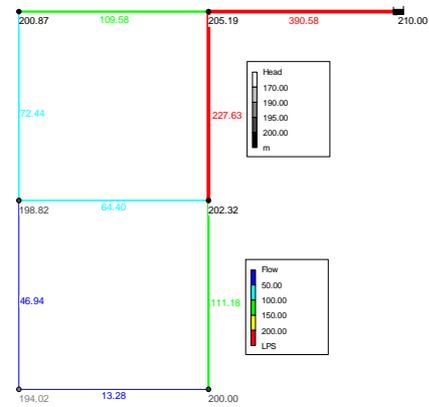
a) Alternativa 1



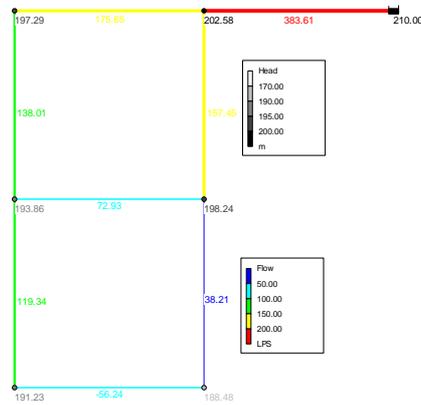
b) Alternativa 228



c) Alternativa 238



d) Alternativa 143



c) Alternativa 140

Figura 5.15 - Visualização da distribuição das cargas hidráulicas (em mH₂O) e das vazões (l/s) para algumas configurações de diâmetros encontradas nas Simulações 1, 2 e 3 da rede Dois Anéis

5.2.2.2 Ordenação das alternativas das Simulações 4, 5 e 6

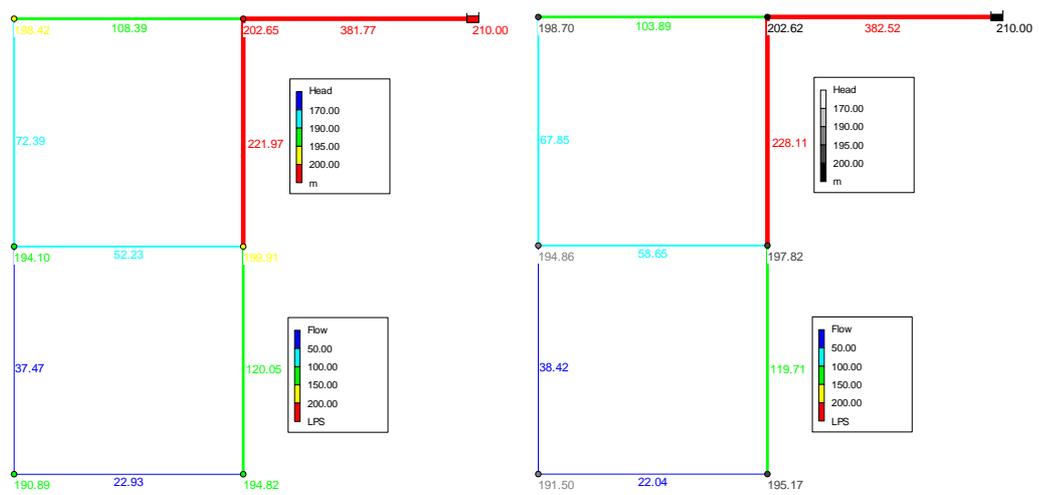
Para as Simulações 4, 5 e 6, procedeu-se ao mesmo processo empregado no item anterior. As soluções com maior compatibilidade, obtidas pelos métodos ELECTRE III e PROMETHEE para a rede Dois Anéis, considerando o conjunto de funções objetivo das Simulações 4, 5 e 6, são apresentadas da Tabela A.13 a A.18 (Anexo II) .

De posse dos resultados obtidos pelos métodos multicriteriais empregados, verifica-se que as soluções de maior preferência apresentaram, para as Simulações 4, 5 e 6 um acréscimo, com relação à rede de menor custo (Figura 5.15a) de 6,6% a 53% para o custo, 14% a 50% para os vazamentos. Para a função resiliëntropia o incremento variou entre 38% e 72%.

Diferente do item anterior verifica-se que uma certa permanência, ou repetição, das alternativas, para todos os tipos de simulações e métodos considerados. As alternativas que obtiveram maior frequência foram a 97 (Figura 5.16a) e 105 (Figura 5.16b) e 108 (Figura 5.16c), que apareceram 4 vezes cada uma. Ademais, 20 alternativas foram listadas apenas uma vez.

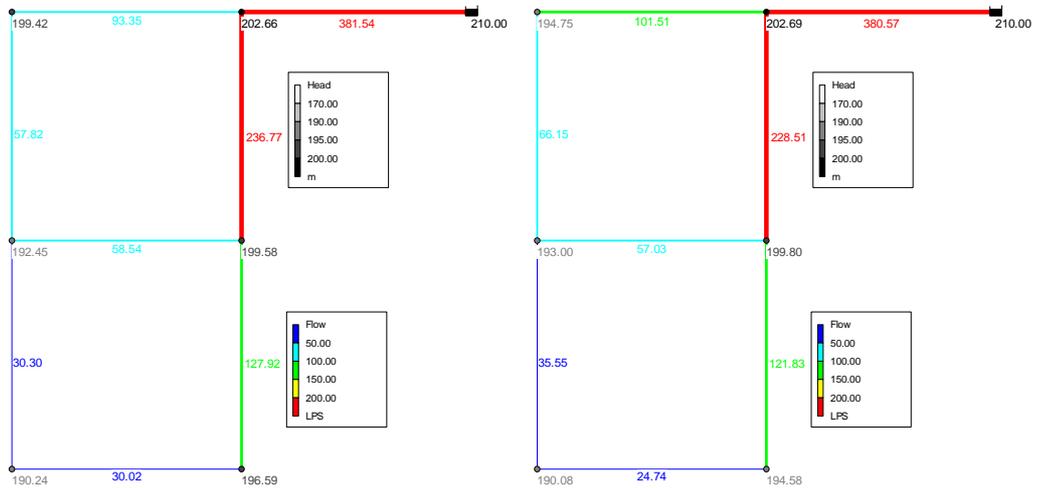
Ainda comparando os resultados obtidos pelas Simulações 4 (Tabela A.13 e Tabela A.14) e 6 (Tabela A.17 e Tabela A.18), constata-se que as alternativas encontradas são semelhantes, diferindo-se apenas em alguns poucos trechos. Isso pode ser constatado comparando-se as melhores alternativas obtida pelo ELECTRE III para as Simulações 4 e 6 (Figura 5.16a e Figura 5.16d, respectivamente). Pode-se inferir das soluções geradas nas Simulações 4 e 6, portanto, que a função resiliëntropia é um bom indicador da confiabilidade. Pode-se constatar do ponto de vista hidráulico que a função resiliëntropia funcionou a contento, uma vez que conseguiu produzir redes com boa distribuição das vazões nos trechos, além de retratar de modo eficiente o comportamento da confiabilidade da rede, requerendo para isso uma quantidade muito menor de cálculo.

Como já mencionado anteriormente, as configurações encontradas para as redes são muito semelhantes. Ademais, para todos os trechos da rede os diâmetros encontrados são praticamente os mesmos, existem na maioria dos casos apenas duas opções de tubulações possíveis.



a) Alternativa 97

b) Alternativa 105



a) Alternativa 108

b) Alternativa 98

Figura 5.16 - Visualização da distribuição das cargas hidráulicas (em mH₂O) e das vazões (l/s) para algumas configurações de diâmetros encontradas nas Simulações 4, 5 e 6 da rede Dois Anéis

Como ocorreu para as Simulações 1, 2 e 3, o método PROMETHEE tendeu a apresentar soluções com menores custos, vazamentos e confiabilidade que o ELECTRE III, o que pode ser atribuído a não existência de uma forma de veto para as alternativas.

5.3 Rede do Bessa

A segunda rede que a metodologia foi aplicada foi a do bairro do Bessa, que teve seus dados apresentados no capítulo anterior. Para esta rede efetuou-se a mesma sequência de simulações utilizadas na rede Dois Anéis, de modo a avaliar as funções propostas.

5.3.1 Geração de Alternativas

Um processo semelhante ao utilizado no item anterior foi adotado para geração de alternativas para a rede do Bessa. Inicialmente aplicou-se o método NSGA-II, para a geração da frente Pareto, considerando os dois conjuntos de objetivos, que fazem parte das Simulações 1 e 4. Os parâmetros do método NSGA-II empregados nas duas situações foram: população inicial 500 e número de gerações 1.000.

Em seguida, efetuou-se o cálculo dos demais objetivos para as soluções encontradas. A seguir é apresentado os resultados obtidos para os conjuntos de simulação considerados.

5.3.1.1 Simulações 1, 2 e 3

A aplicação do método NSGA-II ao conjunto de alternativas pertencentes à simulação 1, possibilitou identificar um total de 6.638 alternativas pertencentes à frente Pareto. Como esse montante de soluções torna a análise difícil, efetuou-se um procedimento de corte, de modo a se reduzir para 500 a quantidade de soluções. Tanto os resultados obtidos inicialmente, quando o resultante do processo de corte são disponibilizados no CD anexo (/Bessa/Resultado Bessa.xls). O tempo gasto para se chegar à população final 510,3 minutos, o que representa 0,0612 s por rede analisada, empregando-se um computador 4 com 2.4 GHz.

A disposição das soluções, considerando os objetivos empregados nas diversas simulações, pode ser visualizada na Figura 5.17. Um resumo dos resultados é apresentado na Tabela 5.22. Os valores das correlações entre as diversas funções objetivo que tratam da confiabilidade são mostrados na Tabela 5.23. A evolução da fronteira Pareto segundo a métrica S é apresentada na Figura 5.18.

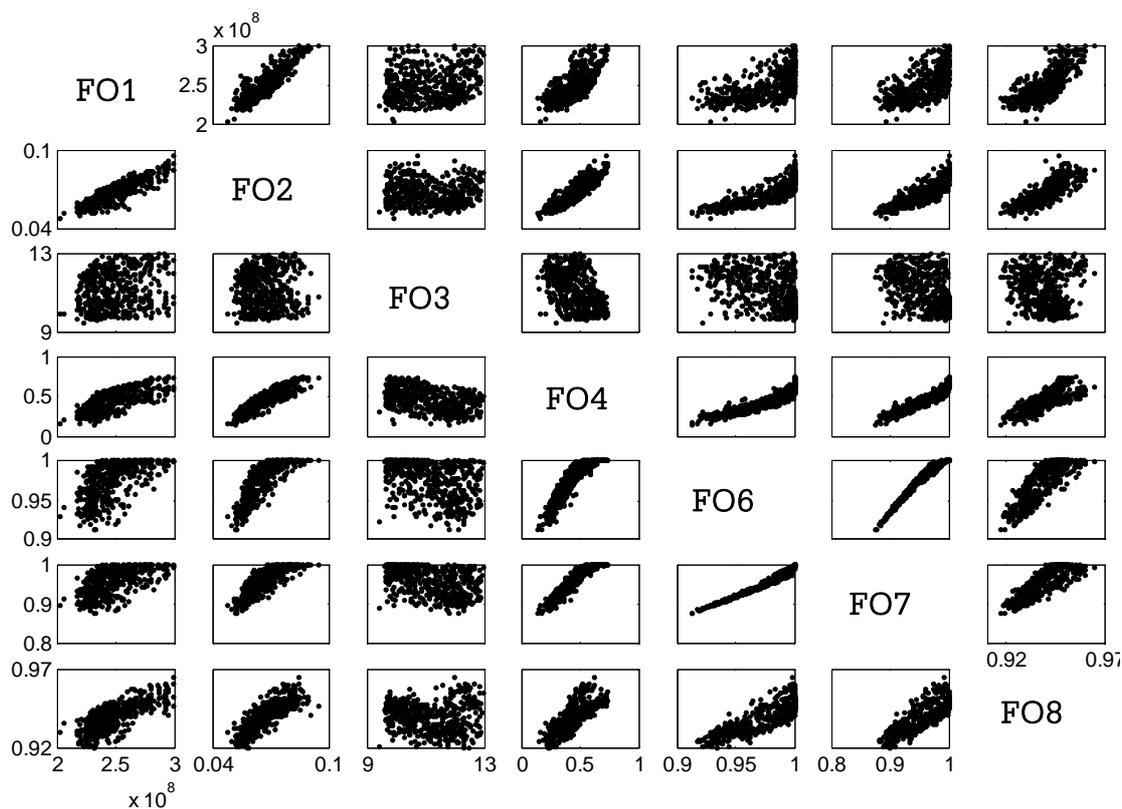


Figura 5.17 - Scatter-matrix dos valores das funções objetivo para as soluções geradas considerando os objetivos das Simulações 1, 2 e 3 da rede do Bessa

Tabela 5.22 - Resumo dos valores das funções objetivo para as soluções geradas considerando os objetivos das Simulações 1, 2 e 3 da rede do Bessa

	FO1 (UMT)	FO2 (l/s)	FO3	FO4	FO6	FO7	FO8
Mínimo	202,798,000	47.534	9.443	0.143	0.912	0.876	0.917
Máximo	385,547,000	121.200	12.984	0.805	1.000	1.000	0.965
Amplitude	182,749,000	73.667	3.541	0.662	0.088	0.124	0.048
Ampl/Min	0.90	1.550	0.375	4.626	0.096	0.141	0.052

Tabela 5.23 - Coeficiente de correlação entre funções objetivo relacionadas à confiabilidade das soluções geradas considerando os objetivos das Simulações 4, 5 e 6 para a rede do Bessa

	FO3	FO4	FO6	FO7	FO8
FO3	1	-0.436	-0.361	-0.412	-0.100
FO4	-0.436	1	0.908	0.946	0.802
FO6	-0.361	0.908	1	0.983	0.825
FO7	-0.412	0.946	0.983	1	0.823
FO8	-0.100	0.802	0.825	0.823	1

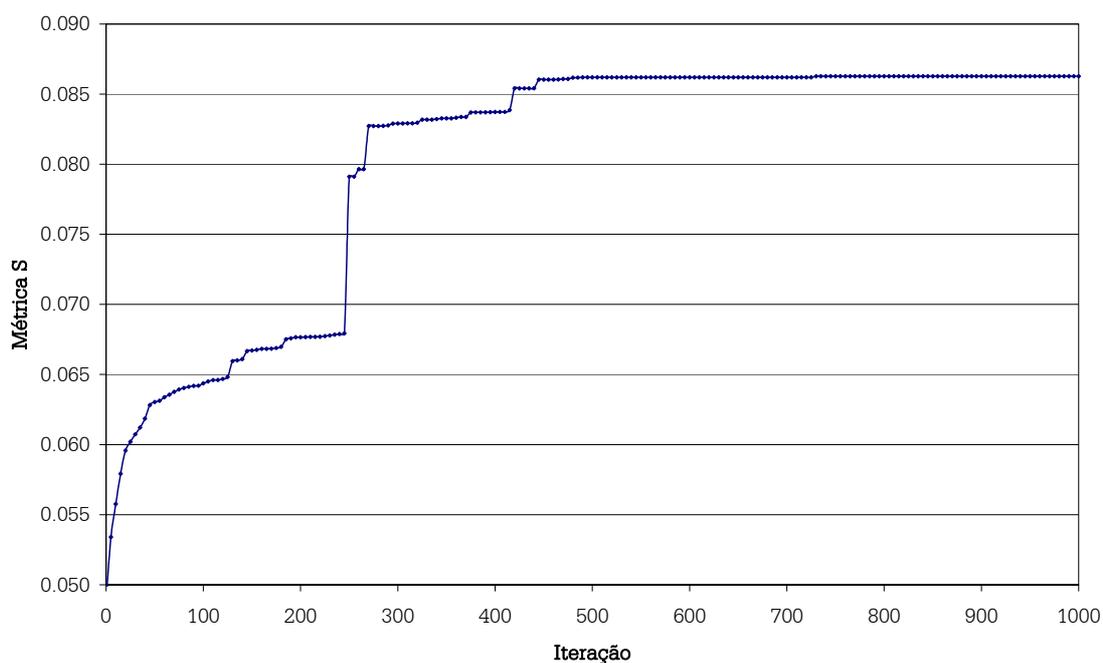


Figura 5.18 - Evolução dos valores da Métrica S para as soluções geradas considerando os objetivos da Simulação 1 da rede do Bessa

Pode-se verificar, com base na Figura 5.17, que as relações observadas no item anterior se repetem em para praticamente todos os pares de objetivos, em que o custo e o vazamento tendem para uma curva exponencial e as funções resiliência, expansibilidade e envelhecimento para uma relação próxima a linear. A principal diferença encontrada ocorre na relação entre as funções de avaliação da confiabilidade que aumentaram o grau de correlação com a tolerância, a exceção da função entropia que continua a não apresentar nenhum padrão com as demais.

Em relação à evolução da fronteira não dominada Figura 5.18, verifica-se que esta apresentou-se formada na iteração 500. Sendo a evolução ocorreu de forma mais rápida, para o conjunto de soluções final, até a iteração 300.

Com relação aos resultados encontrados, verifica-se que para as soluções analisadas, o objetivo que apresentou menor amplitude relativa dos dados foi a tolerância (0,052). Enquanto que a resiliência foi aquele que mostrou maior diferença relativa entre o maior e o menor valor calculado (4,53). Ademais, o restante dos objetivos apresentou um comportamento de variação semelhante ao encontrado para a rede Dois Anéis.

A rede de menor custo, que é um bom parâmetro para medir a eficiência do método em encontrar a frente Pareto, apresentou um gasto total de 202.798.000 UMT.

Este valor representa um aumento de 14% quando comparado com a configuração mais econômica encontrada (FORMIGA, 1999). Porém, para a rede obtida neste trabalho considera o efeito dos vazamentos que responderam por 12% da demanda para a configuração mais econômica.

5.3.1.2 Simulações 4, 5 e 6

A aplicação do método NSGA-II para o conjunto de objetivos da Simulação 4 produziu um total de 4.593 soluções não dominadas. Esse total foi reduzido para 500, após a aplicação de um algoritmo de corte. Para as soluções restantes, calculou-se os objetivos restantes das Simulações 5 e 6. Os resultados das soluções encontradas originalmente e após o corte podem ser encontrados no CD anexo a este trabalho (/Bessa/Resultado Bessa.xls). O tempo gasto para se encontrar a frente foi semelhante ao obtido para a Simulação 1, 504,25 min ou 0,0602s por alternativa avaliada.

A visualização da disposição dos objetivos para as diferentes alternativas geradas é mostrada na Figura 5.19. Um resumo dos resultados obtidos é apresentado na Tabela 5.24, enquanto que na Tabela 5.25 são apresentados os coeficientes de correlação para as funções objetivos que representam a confiabilidade do sistema apresentado. A Figura 5.20 mostra os valores da métrica S do conjunto não dominado ao longo das iterações.

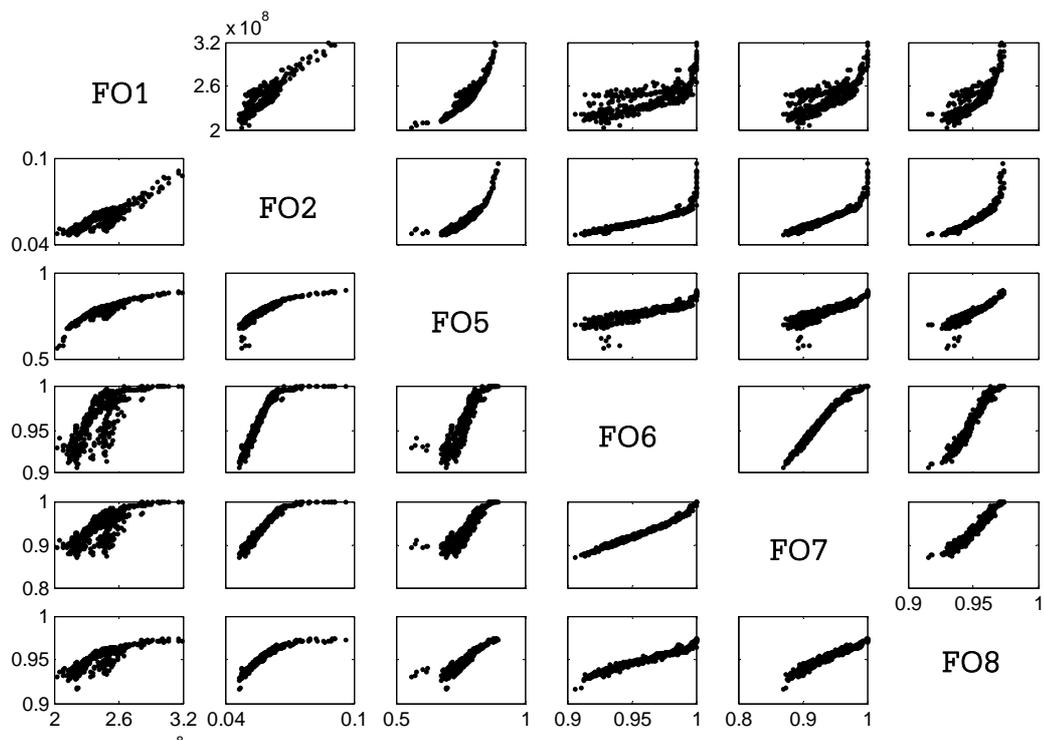


Figura 5.19 - Scatter-matrix dos valores das funções objetivo para as soluções geradas considerando os objetivos das Simulações 4, 5 e 6 da rede do Bessa

Tabela 5.24 - Resumo dos valores das funções objetivo para as soluções geradas considerando os objetivos das Simulações 4, 5 e 6 da rede do Bessa

	FO1 (UMT)	FO2 (l/s)	FO5	FO6	FO7	FO8
Mínimo	202,798,000	46.573	0.558	0.906	0.870	0.916
Máximo	333,608,000	96.506	0.895	1.000	1.000	0.974
Amplitude	130,810,000	49.933	0.337	0.094	0.130	0.058
Ampl/Min	0.65	1.072	0.604	0.103	0.150	0.064

Tabela 5.25 - Coeficiente de correlação entre funções objetivo relacionadas à confiabilidade das soluções geradas considerando os objetivos das Simulações 4, 5 e 6 para a rede do Bessa

	FO5	FO6	FO7	FO8
FO5	1	0.895	0.892	0.930
FO6	0.895	1	0.983	0.976
FO7	0.892	0.983	1	0.969
FO8	0.930	0.976	0.969	1

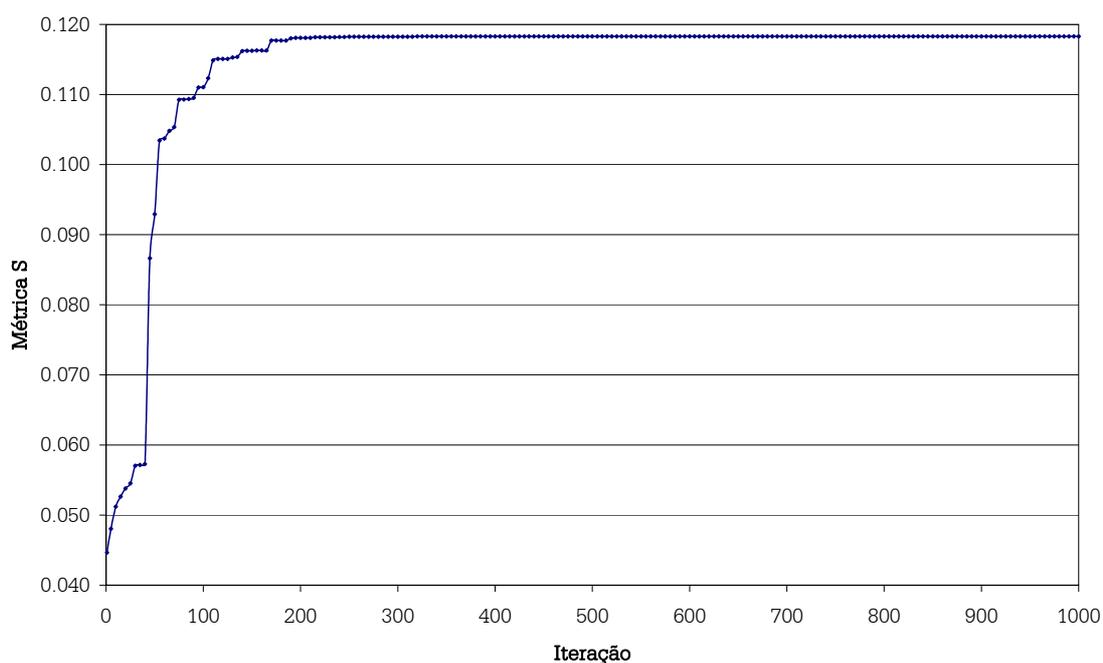


Figura 5.20 - Evolução dos valores da Métrica S para as soluções geradas considerando os objetivos da Simulação 1 da rede do Bessa

De um modo geral, as funções analisadas apresentaram comportamentos bem definidos, linear ou exponencial, umas com as outras (Figura 5.19). Considerando as funções que mensuram a confiabilidade, verifica-se que, estas apresentaram uma relação linear bem definida, o que é corroborado pelos altos valores de correlação encontrados (Tabela 5.25).

Considerando os valores obtidos, verifica-se que as funções apresentaram faixas de variação semelhantes às encontradas no item anterior (Tabela 5.24), com exceção das funções custo e vazamentos que para o caso das soluções geradas pela Simulação 1, apresentaram valores máximos superiores em 16% e 26%, respectivamente, aos encontrados pela Simulação 4, que embora não tenha encontrado redes tão "caras", obteve soluções com valores de tolerância superiores aos da simulação anterior. A frente Pareto teve uma evolução uniforme até aproximadamente a iteração 200, quando praticamente ganhou a sua forma final (Figura 5.20).

Como a rede de custo mínimo foi a mesma para as duas situações, pode-se considerar que, para esse caso, o método NSGA-II, para a configuração de parâmetros proposta, explorou bem a fronteira Pareto.

5.3.2 Ordenação das Alternativas

O processo de escolha das alternativas considerou as mesmas proposições adotadas para a rede Dois Anéis, inclusive os critérios para definição das funções de indiferença, preferência, veto e peso.

5.3.2.1 Simulações 1, 2 e 3

Os valores das funções objetivo para 10 alternativas de maior compatibilidade obtidas pelos métodos ELECTRE III e PROMETHEE, para as Simulações 1, 2 e 3 são apresentados nas Tabelas A.19 a A.24 (Anexo III).

O incremento médio observado no valor da função custo, quando comparado com a rede mais econômica foi de 21,2% para o método ELECTRE III e 23,5% para o PROMETHEE. O valor médio encontrado nas 10 melhores alternativas escolhidas pelo ELECTRE III para a função tolerância foi de 0,942, para o PROMETHEE esse valor foi de 0,943, o que significa um incremento em relação a solução mais econômica (Figura 5.21a) de 1,4% a 1,6%. Pode-se, com isso, considerar que os dois métodos convergiram para a mesma tendência de escolha, o que pode ser constatado nas Tabelas A.19 a A.24.

As alternativas que mais foram elencadas pelos dois métodos foram a 254 (Figura 5.21b) que apareceu 4 vezes. As alternativas 316, 356 e 376, apresentaram 3 aparições cada uma. Ao todo 28 alternativas forem escolhidas apenas uma vez.

Verifica-se que, ao contrário do que ocorreu para a rede Dois Anéis, houve, de um modo geral, uma tendência nas soluções escolhidas considerando as Simulações 1

e 3, o que pode ser constatado, comparando o comportamento das cargas hidráulicas e das vazões para as alternativas que obtiveram melhor ranking considerando o método ELECTREIII, 271 (Figura 5.21c) para a Simulação 1 e 356 (Figura 5.21d) para a Simulação 2. Essa melhor padronização das alternativas pode ser creditada à melhor correlação observada entre as funções relacionadas à confiabilidade.

Hidraulicamente, o comportamento apresentado pelas alternativas pode ser considerado satisfatório, uma vez que permitiu uma boa distribuição do fluxo na rede como um todo, uma vez que não se verificou nenhuma tendência de ramificação no sistema (Figura 5.21b, c e d).

5.3.2.2 Simulações 4, 5 e 6

Os valores das funções objetivo das soluções melhores elencadas pelos métodos multicriteriais empregados neste trabalho, considerando as Simulações 4, 5 e 6 são apresentados nas Tabelas A.25 a A.30 (Anexo III).

Para o método ELECTRE III, observa-se que ocorreu um incremento no custo que variou de 13,5% a 21,2% (média 17,1%). No PROMETHEE, esse aumento foi de 15,9% a 21,9% (média 19,0%). Para a função tolerância, que é a medida para o cálculo da confiabilidade mais precisa empregada neste trabalho, e está presente nos dois conjuntos de simulações, verificou-se um valor médio de 0,955 para o método ELECTRE III e 0,958 para o PROMETHEE. Comparando esses resultados com os apresentados pelas Simulações 1, 2 e 3, constata-se que, embora os valores dos custos sejam semelhantes, as soluções geradas com a função resiliëntropia, obtiveram melhores valores de confiabilidade do que as geradas pela pelo par entropia-resiliência.

Com relação à quantidade de vezes que as soluções foram elencadas entre as 10 melhores, verifica-se que a alternativa 206 (Figura 5.22a) foi aquela que apareceu mais vezes, 5 no total. Em seguida aparecem as configurações 189 (Figura 5.22b) e 210 (Figura 5.22d). Do total de alternativas escolhidas 15 tiveram apenas uma aparição.

Pode-se observar que com base nas Tabelas A.25 a A.30 e na (Figura 5.22) que as alternativas escolhidas na Simulações 4, 5 e 6 apresentaram um comportamento quase idêntico do ponto de vista hidráulico. Verifica-se também que a função resiliëntropia funcionou de modo satisfatório permitindo uma excelente distribuição de fluxo, principalmente nos trechos do Grande Anel (trechos 1 a 7). Verifica-se nesse setor que as vazões afluentes ao nó 4 são praticamente idênticas. Este nó é o responsável pelo abastecimento, em volume, de quase metade da rede.

É importante ressaltar uma diferença entre a rede encontrada considerando a resiliência dos outros métodos empregados para a rede do Bessa, em especial para Grande Anel. Enquanto que todas as outras metodologias consideravam que a melhor maneira de se abastecer o nó 4 era transportando a maior parte das vazões pelos trechos 2, 3 e 4. O método proposto que considera a resiliência, mostrou soluções em que o trecho preferencial é o 5, 6 e 7. Essa consideração apresenta vantagens estratégicas do ponto de vista da confiabilidade do abastecimento do sistema, sem, no entanto, implicar em custos mais altos.

Embora tenha funcionado bem para a maioria dos trechos a resiliência apresentou algumas limitações para os trechos 18 e 19 da rede. Isso pode ser atribuído a uma supervalorização ocorrida para na distribuição do fluxo em torno do nó 10, em que o método procurou uma forma de dividir a vazão afluyente a este ponto o mais equânime possível em três nós adjacentes, aumentando assim o valor da função FO5. Com isso sugere-se uma maior atenção para o ajuste da função resiliência em para nós com mais de 3 trechos incidentes.

5.4 Rede RF1

A última rede avaliada neste trabalho é a que abastece diversos bairros da cidade de Campo Grande a partir do reservatório denominado RF1. Esta rede apresenta como característica uma topografia bastante acidentada com um desnível de até 95 metros. Este sistema será avaliado considerando duas situações. Na primeira a rede será dimensionada sem a levar em conta a colocação de válvulas redutoras de pressão. Na outra situação será considerado no processo de dimensionamento a locação de mecanismos de redução de pressão em alguns pontos predeterminados da rede. Este item trata da primeira situação.

5.4.1 Geração de Alternativas

Empregou-se para a rede RF1 um processo igual ao utilizado no Bessa. A frente não dominada foi gerada a partir do método NSGA-II para conjuntos de funções objetivo das Simulações 1 e 4. Nesse processo foram considerados uma população inicial de 1.000 indivíduos, com um número de iterações também igual a 1.000. Após esse procedimento, calcularam-se os valores das demais funções objetivo.

5.4.1.1 Simulações 1, 2 e 3

O uso método NSGA-II para o conjunto de objetivos da Simulação 1 permitiu obter um total de 5.013 alternativas pertencentes à frente Pareto, esse total foi reduzido em seguida para 500 soluções aplicando-se um processo de corte. Os resultados obtidos originalmente e os resultantes do processo de corte são disponibilizados no CD anexo (/Bessa/Resultado RF1.xls). O tempo gasto para se chegar à população final 1.561,4 minutos, o que representa 0,0937s por rede analisada, empregando-se um computador Pentium 4 com 2.4 GHz.

A disposição das soluções, considerando os objetivos empregados nas diversas simulações, é apresentada na Figura 5.23. Um resumo dos resultados encontrados é mostrado na Tabela 5.26. Na Tabela 5.27 são apresentados os valores das correlações das soluções encontradas para as funções objetivo que maximizam a confiabilidade. A evolução da métrica S de desempenho da frente Pareto é mostrada na Figura 5.24.

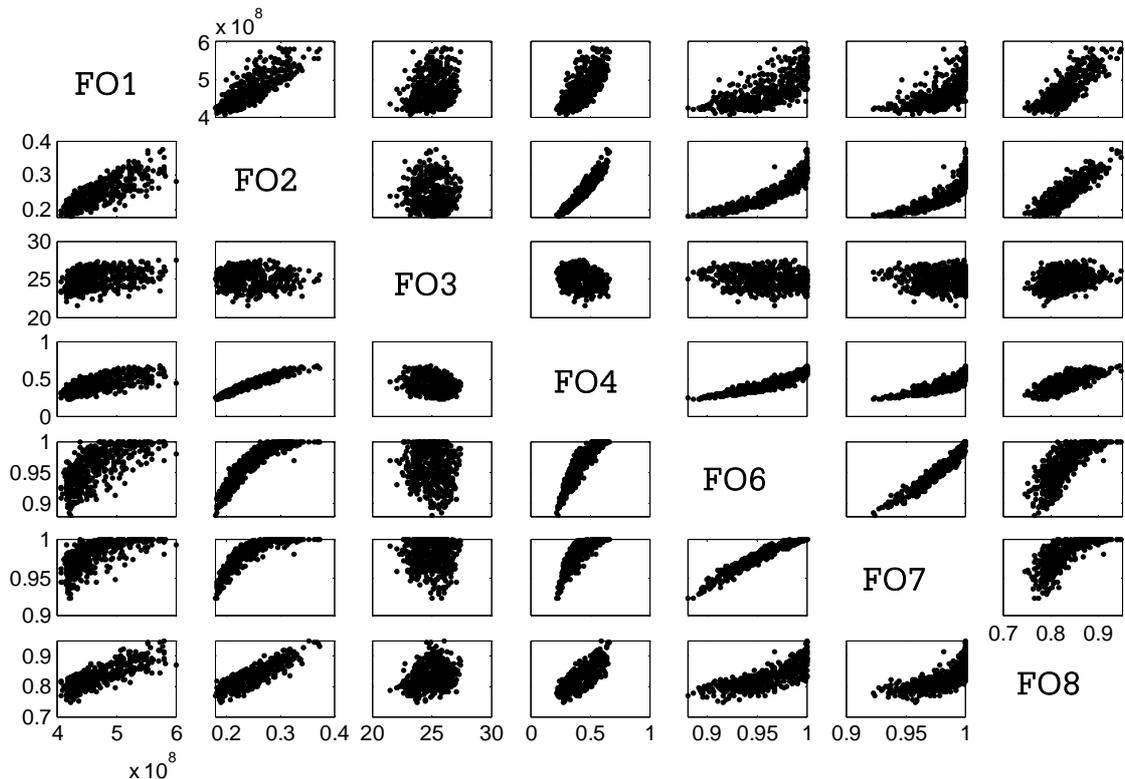


Figura 5.23 - Scatter-matrix dos valores das funções objetivo para as soluções geradas considerando os objetivos das Simulações 1, 2 e 3 da rede RF1

Tabela 5.26 - Resumo dos valores das funções objetivo para as soluções geradas considerando os objetivos das Simulações 1, 2 e 3 da rede RF1

	FO1 (UMT)	FO2 (l/s)	FO3	FO4	FO6	FO7	FO8
Mínimo	407,096,000	181.619	21.495	0.226	0.881	0.922	0.739
Máximo	602,243,000	374.296	27.412	0.666	1.000	1.000	0.965
Amplitude	195,147,000	192.677	5.917	0.441	0.119	0.078	0.226
Ampl/Min	0.48	1.061	0.275	1.954	0.135	0.085	0.305

Tabela 5.27 - Coeficiente de correlação entre funções objetivo relacionadas à confiabilidade das soluções geradas considerando os objetivos das Simulações 1, 2 e 3 da rede RF1

	FO3	FO4	FO6	FO7	FO8
FO3	1	-0.293	-0.141	-0.069	0.240
FO4	-0.293	1	0.920	0.846	0.768
FO6	-0.141	0.920	1	0.965	0.782
FO7	-0.069	0.846	0.965	1	0.736
FO8	0.240	0.768	0.782	0.736	1

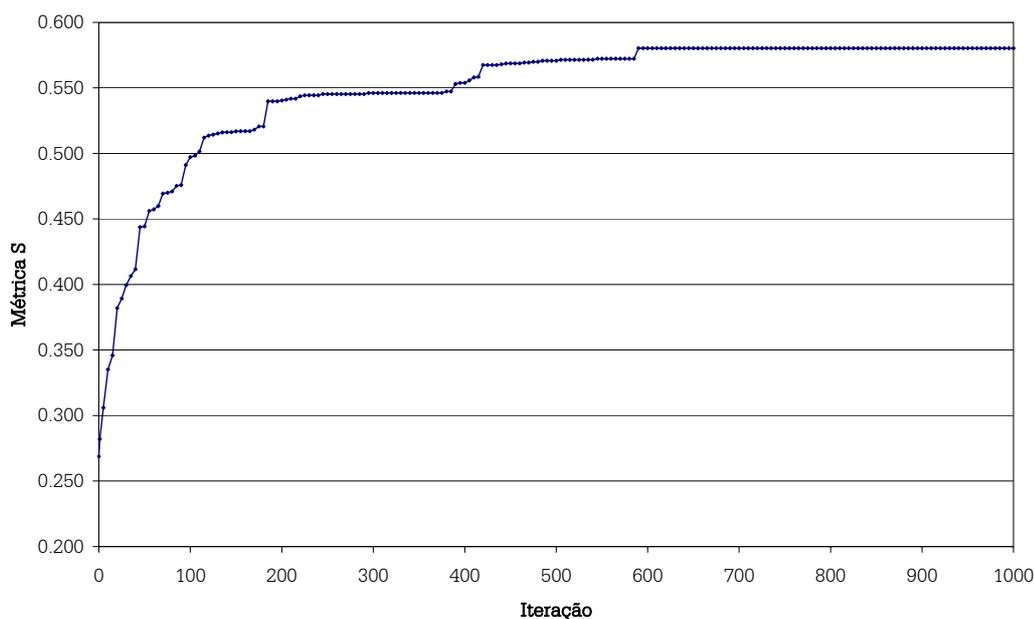


Figura 5.24 - Evolução dos valores da Métrica S para as soluções geradas considerando os objetivos da Simulação 1 da rede RF1

Os resultados apresentados indicam um elevado nível de perdas para a rede, entre 181 a 374 l/s, correspondendo a 29% e 59% das demandas. Esse alto índice de vazamentos é decorrente da topografia irregular, o que ocasiona pressões muito elevadas em vários pontos da rede, sendo em alguns locais superiores aos estabelecidos por norma. A solução de menor custo encontrada foi de 407.096.000, como não existem outros estudos relativos à minimização dos custos de projeto desta rede não é possível afirmar se foi possível chegar a um valor extremo para o custo.

Como ocorreu para a rede do Bessa, pode-se verificar um bom nível de correlação entre as funções relacionadas à confiabilidade (Tabela 5.27 e Figura 5.23). Como em todos os casos anteriores, a única exceção encontrada foi a função entropia.

A evolução da frente não dominada indica que, apesar de ter evoluído significativamente até a iteração 200, o conjunto de soluções só estabilizou após 600 gerações.

5.4.1.2 Simulações 4, 5 e 6

O método multiobjetivo evolucionário NSGA-II, aplicado ao problema com as funções da Simulação 4, encontrou um total de 914 soluções não dominadas, que sofreram um processo de corte até resultar 500 alternativas (CD anexo: /Bessa/Resultado RF1-V.xls). A obtenção de um número menor de soluções não dominadas, quando se compara à rede do Bessa, que embora de mesmo porte tenha uma menor quantidade de trechos, e conseqüentemente, de variáveis de decisão, parece incoerente. Entretanto, do ponto de vista dos arranjos possíveis para a rede, o sistema do Bessa é mais diversificado do que o RF1, pois possui um maior de anéis com apenas dois trechos (1 e 8) não pertencendo a nenhum anel, enquanto que esse número no sistema RF1 é de 26. O tempo total gasto para se chegar ao conjunto de soluções final foi de 1.504 min o que resulta em aproximadamente 0,0902 segundos por alternativa analisada.

A representação gráfica das soluções encontradas para as Simulações 4, 5 e 6, considerando os diferentes objetivos envolvidos é apresentada na Figura 5.25, a Tabela 5.28 mostra o resumo desses valores. Os coeficientes de correlação entre as funções de confiabilidade são apresentados na Tabela 5.29, enquanto que na Figura 5.26, é mostrada a evolução da métrica S de desempenho para a fronteira não dominada.

A comparação dos resultados obtidos para os dois conjuntos de simulações permite afirmar que, a adoção da função resiliëntropia permitiu, para a rede RF1, encontrar valores substancialmente melhores do que os obtidos na Simulação 1. Isso se torna evidente, ao se comparar as alternativas de mínimo custo para as duas situações, que mostraram uma diferença de 10%. De modo a verificar se este resultado sofria influência da semente aleatória, procedeu-se algumas simulações adicionais, que continuaram a apresentar o mesmo desempenho. Esse comportamento de se obter melhores resultados também é refletido nas funções vazamentos e tolerância, comum aos dois casos (Tabela 5.28).

Pode-se verificar ainda que, de forma semelhante aos casos estudados até o momento, as funções que representam a confiabilidade mostraram uma boa aderência uma com as outras, o que refletiu em elevados índices de correlação (Tabela 5.29 e Figura 5.25)

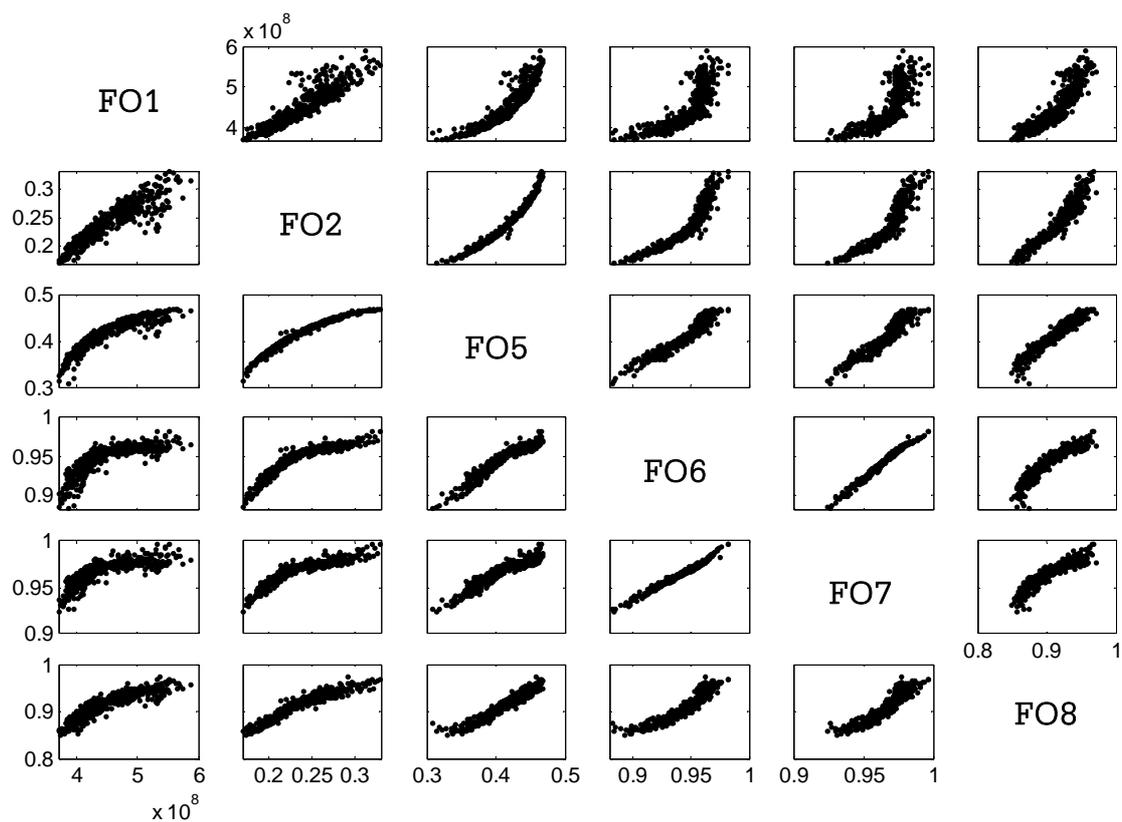


Figura 5.25 - Scatter-matrix dos valores das funções objetivo para as soluções geradas considerando os objetivos das Simulações 1, 2 e 3 da rede RF1

Tabela 5.28 - Resumo dos valores das funções objetivo para as soluções geradas considerando os objetivos das Simulações 1, 2 e 3 da rede RF1

	FO1 (UMT)	FO2 (l/s)	FO5	FO6	FO7	FO8
Mínimo	370.556.000	165,936	0,308	0,883	0,924	0,778
Máximo	587.514.000	329,133	0,468	0,983	0,997	0,972
Amplitude	216.958.000	163,197	0,160	0,100	0,072	0,194
Ampl/Min	0,59	0,983	0,520	0,113	0,078	0,249

Tabela 5.29 - Coeficiente de correlação entre funções objetivo relacionadas à confiabilidade das soluções geradas considerando os objetivos das Simulações 1, 2 e 3 da rede RF1

	FO5	FO6	FO7	FO8
FO5	1	0,952	0,939	0,963
FO6	0,952	1	0,992	0,933
FO7	0,939	0,992	1	0,923
FO8	0,963	0,933	0,923	1

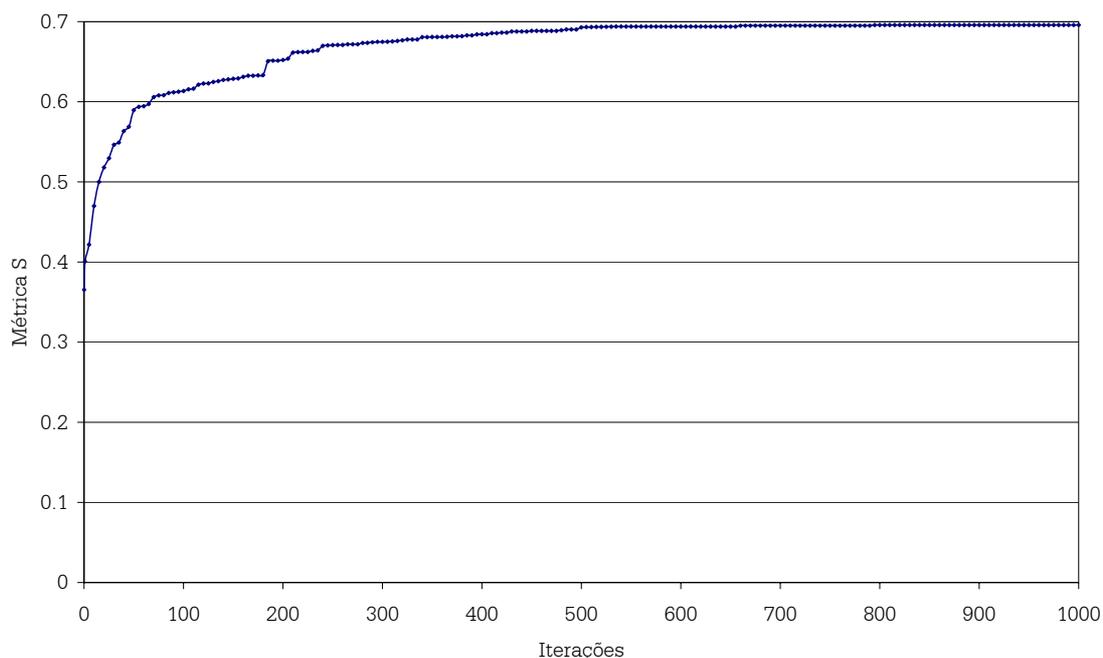


Figura 5.26 - Evolução dos valores da Métrica S para as soluções geradas considerando os objetivos da Simulação 1 da rede RF1

5.4.2 Ordenação das Alternativas

Após serem estabelecidas as alternativas da frente não dominada procedeu-se a definição de quais seriam as de maior compatibilidade com as preferências do decisor. Para o caso da rede RF1, consideraram-se os mesmos valores para os critérios (indiferença, preferência, veto e peso) necessários a escolha das soluções.

5.4.2.1 Simulações 1, 2 e 3

As alternativas de maior compatibilidade considerando as Simulações 1, 2 e 3 estão elencadas no Anexo IV (Tabelas A.31 a A.36). Do ponto de vista dos métodos multicriteriais verifica-se que, para as Simulações 1, 2 e 3, o método PROMETHEE tendeu a encontrar soluções com custo menor do que as encontradas pelo ELECTRE III, porém essa diferença não é significativa visto que a média desses valores é inferior a 2%.

Como ocorreu para a rede do Bessa, as funções de confiabilidade obtiveram bons índices de correlação. Esse comportamento refletiu na escolha das soluções parecidas (Figuras A.11 a A.13), sendo que as alternativas que tiveram uma maior aparição entre as dez de maior preferência foram a 139 (Figura A.11) e 184 (Figura A.12) com 4 escolhas cada uma.

Ainda com relação às soluções encontradas, pode-se dizer que, considerando as Simulações 1 e 3, houve uma tendência da preferência convergir para a mesma

configuração. O que pode ser verificado comparando-se os valores encontrados para as melhores alternativas encontradas pelo Método ELECTRE III para os dois casos, 199 (Figura A.13) e 184 (Figura A.12), respectivamente.

Do ponto de vista hidráulico, os resultados encontrados para esse sistema podem ser considerados satisfatórios, uma vez que conseguiu na maioria dos casos, achar uma boa distribuição para o fluxo. A exceção foram os trechos 90 a 97 que apresentaram uma tendência de ramificação.

5.4.2.2 Simulações 4, 5 e 6

Nas Tabelas A.31 a A.36 (Anexo IV) são apresentados os valores das funções objetivo para as alternativas de maior compatibilidade considerando as Simulações 4, 5 e 6.

Verifica-se que, de modo semelhante ao ocorrido nos casos anteriores para este conjunto de simulações, as soluções de maior preferência obtiverem uma boa convergência para uma configuração comum (Tabelas A.31 a A.36 e Figuras A.15 a A.17). Pode-se constatar com base nestas figuras que, para a maioria das bifurcações, tanto as vazões afluentes quanto defluentes foram relativamente próximas, não indicando, *a priori*, um caminho preferencial para o fluxo. No entanto, em alguns trechos este comportamento não ocorreu.

Para os trechos 90 a 95 (Figuras A.5 a A.7), o método encontrou diâmetros menores que os pertencentes aos trechos adjacentes, fazendo que a rede como um todo se comportasse não como uma malha, mas como duas ramificações. Isto foi fruto de uma deficiência na esqueletização do sistema. O modo que se efetuou a simplificação da rede serviu apenas para retirar os trechos que influenciariam pouco no processo de otimização não havendo uma preocupação quanto ao funcionamento do sistema como um todo. No entanto, para que o método funcione a contento, é preciso definir antecipadamente como o sistema deverá funcionar, ou seja, quais seriam os anéis principais da rede, quais os caminhos alternativos para a água fluir em caso de quebra, etc. Conclui-se com isso, que, mesmo uma metodologia eficiente, a proposta neste trabalho, não é capaz de corrigir falha de planejamento. Uma forma de se contornar esse problema seria o desenvolvimento de uma rotina preliminar ao dimensionamento que produzisse um layout mais eficiente para rede.

5.5 Rede RF1 - com Locação de Válvulas Redutoras de Pressão

Como observado anteriormente, a rede RF1 apresenta altos índices de vazamentos no sistema, que se devem fundamentalmente à topografia do terreno

onde ela está inserida. A forma de se tentar minorar estas perdas foi através da inclusão de válvulas redutoras de pressão ao sistema. A locação dessas válvulas foi feita seguindo a metodologia apresentada a seguir.

A metodologia empregada para a locação das válvulas é dividida em duas partes. Na primeira é feita a disposição dos componentes. Sendo o número de trechos da rede muito grande (104), e verificando que para a maioria deles a válvula colocada não funcionaria a contento. Escolheram-se 6 possíveis locais para se locar estas estruturas. Tais locais foram adotados levando-se em conta dois critérios: não estarem localizados em um malha menor, pois seria preciso a colocação de válvulas muito próximas nos dois tramos em paralelo; e, ter a jusante nós com cotas mais baixas. Considerando esses aspectos foram selecionados os seguintes trechos como candidatos a receberem VRPs: 6, 10, 15, 26, 50 e 61. Após se efetuar algumas análises preliminares, verificou-se que o trecho 10 nunca foi escolhido. Isto implicou na sua retirada como possível solução.

O parâmetro mais importante para a VRP é a chamada pressão, ou carga, de serviço (h_{red}). Neste trabalho, a forma de determinação dessas cargas foi feita através de um processo iterativo descrito a seguir.

Inicialmente é efetuado o cálculo da rede para a situação de máxima demanda considerando a não existência de válvulas. Desta simulação são obtidos os valores das cargas hidráulicas e vazões necessárias ao cálculo da confiabilidade. Em seguida, considerando os dispositivos locados no processo de otimização, verifica-se o ponto a jusante da VRP que possui o menor valor de pressão (P_{min}^v). Considerando que a válvula está situada no final do trecho j o valor da altura de serviço será:

$$h_{red}^v = h_{j,2} - (P_{min}^v - 15) \quad \text{se } P_{min}^v > 15 \quad (5.6)$$

Em seguida, calcula-se, já considerando o funcionamento das válvulas, as novas pressões mínimas, que se for menor do que 15,1 mH₂O, considera-se que o valor de h_{red}^v está ajustado. Caso contrário procede-se um novo ajuste para h_{red}^v . Após a definição das alturas de serviço das válvulas, calculam-se os vazamentos do sistema, considerando todas as demais de demanda.

5.5.1 Geração de Alternativas

O caso anterior, a otimização da rede RF1 sem válvulas, indicou que as alternativas geradas pela configuração de objetivos da Simulação 4 apresentaram

resultados significativamente superiores às obtidas pela Simulação 1. Assim, empregou-se para o dimensionamento do sistema RF1 com locação de válvulas, apenas o conjunto de funções das Simulações 4, 5 e 6. Sendo empregado como parâmetros do método NSGA-II para geração de alternativas, a população inicial e o número de iteração iguais a 1.000.

O montante de soluções encontradas pelo método NSGA-II para o conjunto de objetivos da Simulação 4 foi de 963, que foi reduzido para 500 após o processo de corte. Os resultados obtidos originalmente e os resultantes do processo de corte são disponibilizados no CD anexo (/Bessa/Resultado RF1 com Valvulas.xls). O total de tempo gasto para se atingir o conjunto de soluções final 4431 minutos, ou seja 0,2658s, por rede analisada. Este valor é cerca de 3 maior que o encontrado quando não se considera a locação das VRPs.

O comportamento das soluções, considerando os objetivos empregados nas simulações é pode ser visto na Figura 5.27. Um resumo dos valores dos objetivos é apresentado na Tabela 5.30. Na Tabela 5.31 são apresentados os valores das correlações para as funções objetivo relativas à confiabilidade das soluções não dominadas. A evolução da métrica S ao longo das iterações é mostrada na Figura 5.28.

A principal diferença entre os valores das funções objetivos obtidos para a rede RF1 considerando, ou não, a presença de VRPs, está presente, como era de se esperar, na função objetivo vazamento Tabela 5.30. No entanto, o comportamento da função mostrou-se surpreendente Figura 5.27. Diferente do que ocorreu em todos os casos anteriores, os valores mínimos de vazamentos não corresponderam às redes de menores custos. Ao contrário, verificou-se uma tendência dos vazamentos diminuírem, à medida que as redes ficavam mais “caras”. Os aspectos hidráulicos relativos a esse comportamento serão comentados no próximo item.

Com relação ao comportamento da fronteira não dominada ao longo das iterações (Figura 5.28), verifica-se que houve uma estabilização da frente a partir da iteração 300 aproximadamente.

As funções expansibilidade e envelhecimento mostraram valores de correlação menores com as demais funções de confiabilidade, quando comparados ao caso anterior. Porém, resiliência e a tolerância continuaram a apresentar altos índices para esse indicador de ajuste.

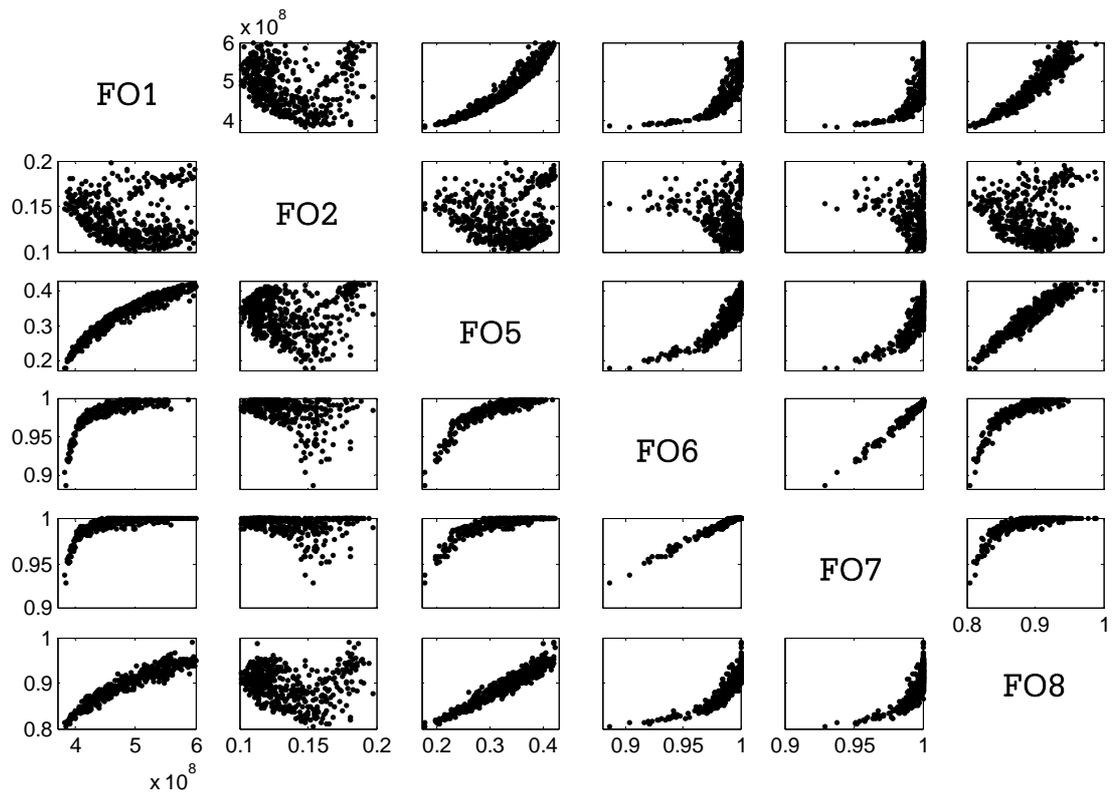


Figura 5.27 - Scatter-matrix dos valores das funções objetivo para as soluções geradas considerando os objetivos das Simulações 1, 2 e 3 da rede RF1 com locação de válvulas

Tabela 5.30 - Resumo dos valores das funções objetivo para as soluções geradas considerando os objetivos das Simulações 1, 2 e 3 da rede RF1 com locação de válvulas

	FO1 (UMT)	FO2 (l/s)	FO5	FO6	FO7	FO8
Mínimo	382.307.000	101,421	0,175	0,886	0,929	0,795
Máximo	609.274.000	229,853	0,424	1,000	1,000	0,976
Amplitude	226.967.000	128,432	0,248	0,114	0,071	0,181
Ampl/Min		0,59	1,415	0,128	0,076	0,227

Tabela 5.31 - Coeficiente de correlação entre funções objetivo relacionadas à confiabilidade das soluções geradas considerando os objetivos das Simulações 1, 2 e 3 da rede RF1 com locação de válvulas

	FO5	FO6	FO7	FO8
FO5	1	0.854	0.774	0.960
FO6	0.854	1	0.982	0.823
FO7	0.774	0.982	1	0.744
FO8	0.960	0.823	0.744	1

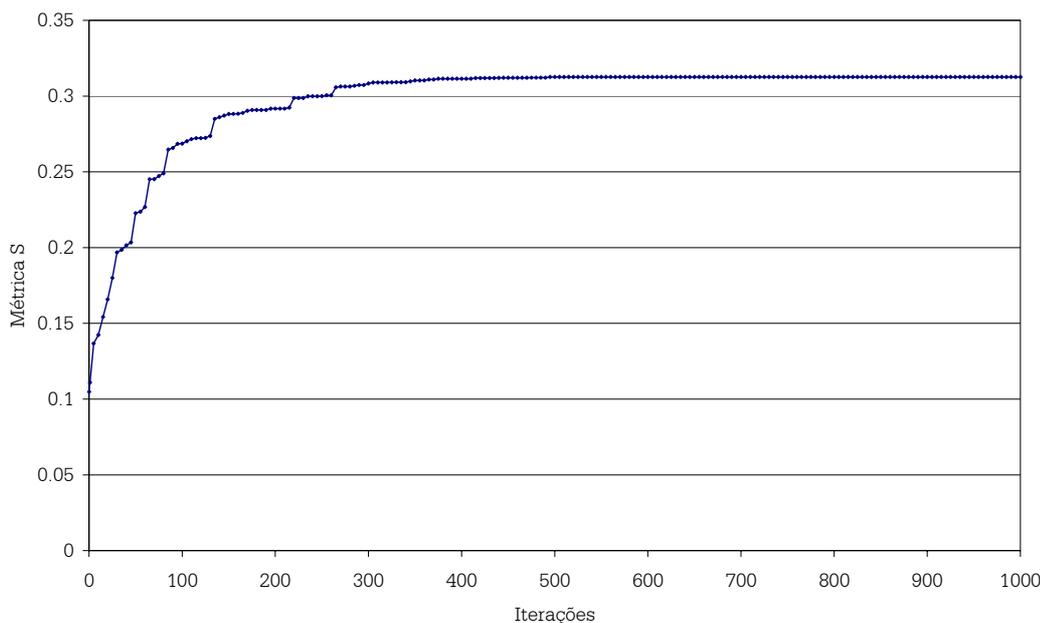


Figura 5.28 - Evolução dos valores da Métrica S para as soluções geradas considerando os objetivos da Simulação 1 da rede RF1 com locação de válvulas

5.5.1.1 Ordenação das Alternativas

Conforme foi enunciado no item 5.2.2, a premissa empregada na definição dos pesos do problema foi de que o conjunto de objetivos deve ter o mesmo peso no processo. Nos casos anteriores, verificava-se que os objetivos custo e vazamento eram convergentes, uma vez que priorizam redes de diâmetros menores. Para a situação apresentada aqui isto não ocorre, pois se verificou que estes objetivos não eram convergentes. Com isso, os pesos referentes aos diferentes objetivos adotados para a presente situação serão calculados considerando os três objetivos em separado (Tabela 5.32).

Tabela 5.32 - Pesos das funções objetivo empregadas nos métodos ELECTRE III e PROMETHEE para as diversas simulações da RF1 com locação de válvulas.

	FO1	FO2	FO5	FO6	FO7	FO8
Simulação 4	0,333	0,333	0,333	-	-	-
Simulação 5	0,333	0,333	-	0,167	0,167	-
Simulação 6	0,333	0,333	-	-	-	0,333

Os valores das funções objetivo para as alternativas de maior compatibilidade considerando as Simulações 4, 5 e 6 são apresentados nas Tabelas A.43 a A.48 (Anexo V). Com base nas configurações melhor classificadas pelos métodos ELECTRE III e PROMETHEE para rede RF1 com locação de VRPs, verifica-se que houve um incremento médio de 23% para o custo da rede quando comparados com a solução de mínimo custo, Alternativa 1 (Figura A.18), enquanto que para o vazamento houve uma redução de 25%.

O comportamento observado quanto à distribuição dos fluxos na rede foi praticamente o mesmo obtido para a situação em que não havia válvulas, apresentando as mesmas virtudes e limitações. Quando se considera o custo de cada sistema, verifica-se que as redes selecionadas neste item, apresentaram uma elevação de aproximadamente 8% quanto comparados ao caso anterior, sendo, as perdas por vazamento apenas metade.

A preferência por redes mais onerosas reflete o fato de que para sistemas que possuem mais folgas, é possível se obter uma melhor distribuição dos fluxos considerando a metodologia proposta neste trabalho. Tal comportamento pode ser verificado comparando-se as alternativas de mínimo custo encontrada, Alternativa 1, (Figura A.18), e de maior número de aparições, Alternativa 227 (Figura A.18). Pode-se verificar, com base na Figura A.18, que a válvula localizada no trecho 61 não foi utilizada plenamente, visto que as pressões à jusante da mesma atingiram valores muito elevados. A carga de serviço desta VPR não pode ser reduzida mais, pois a pressão no nó 77 ficaria abaixo da permitida. Tal situação não se repete para a alternativa 227, pois mesmo mantendo pressões mais baixas, foi possível garantir, para a situação de demandas máxima, um mínimo de carga para os nós de jusante. Esse comportamento, embora não tão explícito como neste caso, ocorreu para as outras válvulas locadas na rede. Em todos os casos melhor escolhidos pelos os métodos multicriteriais, as válvulas só precisariam ser alocadas nos trechos 15, 50 e 61.

Com base nos resultados obtidos para todas as redes analisadas neste trabalho, pode-se responder às perguntas postas no início dessa discussão:

- As medidas indiretas de confiabilidade são representativas?

Em duas das três redes analisadas (Bessa e RF1), o par de funções entropia-resiliência encontrou resultados semelhantes à função tolerância, no entanto esses resultados eram inferiores aos obtidos pela função resilientropia.

- O acréscimo de outros objetivos, após a fase de geração das alternativas, modifica a solução final encontrada?

As funções efeito do envelhecimento e a expansividade não acrescentaram novas, informações ao problema visto uma vez que podem ser representadas pela resiliência.

- A resilientropia é uma medida eficiente para se medir a confiabilidade?

A resilientropia mostrou-se adequada para todas as redes analisadas, representando se ajustando bem à medida formal de confiabilidade, o que pode ser comprovado pelos altos índices de correlação e pela reprodução de praticamente os mesmos resultados obtidos pelos métodos multicriteriais.

6. CONCLUSÕES

O objetivo geral desta tese foi elaborar uma metodologia de dimensionamento de redes de distribuição de água considerando como objetivos a minimização dos custos e dos vazamentos e a maximização da confiabilidade do sistema. A primeira etapa desse trabalho foi detectar os problemas e/ou lacunas existentes a respeito do tema na bibliografia. Verificou-se que os métodos desenvolvidos até o momento apresentavam dificuldades de encontrar redes que pudessem ser utilizadas na prática principalmente por encontrarem como resultados sistemas ramificados. A forma de se superar isto têm sido o emprego de funções de confiabilidade. Métodos tradicionais de cálculo da confiabilidade empregados como *cut-set* e simulações Monte-Carlo, elevam significativamente o tempo de processamento, sendo que, para problemas de maior porte, o seu emprego seria inviável. Métodos heurísticos como resiliência e entropia não consideram todos os aspectos envolvidos na confiabilidade das redes.

A estratégia empregada para o dimensionamento das redes foi a proposta por Neufville, Schaake e Stafford (1971), que é composta de cinco partes. A primeira etapa do problema diz respeito à *definição dos objetivos* a serem otimizados. Como resultado da pesquisa bibliográfica feita, foram eleitos os três objetivos gerais: *custo*, *confiabilidade* e *vazamento*. A segunda etapa da metodologia é a *escolha das funções* que representarão os objetivos. Foram elencadas 9 funções para representar os 3 objetivos almejados. No entanto, das funções escolhidas, 7 foram destinadas a representar a confiabilidade da rede, ao passo que os outros dois objetivos tiveram uma função cada. A função resilientropia foi o modo encontrado de se tentar superar as dificuldades enfrentadas quando se quer considerar eficientemente, no dimensionamento de RDAs, a confiabilidade do sistema. A etapa seguinte da metodologia é a *geração de soluções não dominadas*. Para este fim foram empregados métodos baseados em algoritmos evolucionários multiobjetivos NSGAI e SPEA. A quarta parte da metodologia, que funciona concomitantemente com a geração da frente Pareto, é a *avaliação das alternativas*. Um modelo foi particularmente desenvolvido a partir dos métodos *Híbrido* e *Gradiente*, em que foram efetuadas modificações no equacionamento dessas metodologias, de modo a considerar os vazamentos na rede, bem como a demanda como sendo uma variável, dependente das pressões nos nós. Essas modificações são necessárias para avaliar as alternativas segundo as diversas funções objetivo propostas. Os métodos foram implementados em linguagem C++, utilizando o compilador Borland Builder C++ 5.5. Por fim as alternativas pertencentes à frente Pareto foram avaliadas considerando critérios de preferência de um decisor. Para se chegar a esse

fim, foram utilizados dois métodos multicriteriais para classificar essas alternativas: ELECTRE III e o PROMETHEE.

A metodologia desenvolvida ao longo desse trabalho para o dimensionamento de sistemas de distribuição de água foi aplicada a três configurações de redes. A primeira configuração, chamada Dois Anéis, é uma rede teórica e vem sendo muito utilizada na literatura para testar novos métodos. As outras duas redes, Bessa e RF1, são layouts reais e serviram para atestar a aplicabilidade do método no dimensionamento de sistemas a casos concretos. Para a rede RF1 verificou-se ainda a influência da locação de VRPs.

Antes de se efetuar a aplicação direta dos métodos procedeu-se a identificação de qual seria a melhor configuração dos métodos utilizados nas etapas de *avaliação das alternativas* e a *geração das soluções não dominadas*. Esta avaliação foi necessária, uma vez que esses modelos apresentam níveis de complexidades elevados e são compostos por diversas partes. Para o modelo de avaliação de alternativas foram testadas as duas metodologias de resolução do balanço hidráulico na rede: métodos Híbrido e Gradiente. Verificou-se que o método Gradiente se mostrou mais adequado quando se lida com problemas sem componentes hidráulicos especiais, como válvulas. Enquanto que o Híbrido mostrou-se mais eficiente na análise de redes que possuem tais características.

Outra parte do modelo de análise hídrica estudado foi a adequação das técnicas resolução de sistemas lineares. Foram analisados cinco métodos de resolução desses sistemas: Fatorização de Gauss, Fatorização de Cholesky, Gradiente Conjugado, Gradiente Conjugado Pré-condicionado Cholesky e Gradiente Conjugado Pré-condicionado Diagonal. Do ponto de vista da eficiência pode-se constatar que para problemas de pequeno porte, redes com até 40 nós, o método mais eficiente foi a Eliminação de Gauss. Para sistemas de médio porte, com o número de nós entre 40 e 800, a Fatorização de Cholesky se mostrou mais eficaz, enquanto que para redes com mais de 800 nós, tidas como de grande porte do ponto de vista computacional, o método Gradiente Conjugado Pré-condicionado Fatorização de Cholesky Incompleta foi o mais recomendado.

Visando escolher a metodologia multiobjetivo e seus operadores mais adequados ao problema, fez-se uma análise de algumas técnicas comumente utilizadas. Os métodos multiobjetivos evolucionários avaliados para a geração da fronteira Pareto foram o *NSGAI* e o *SPEA*, que tiveram seu código implementado na biblioteca MOLHLib++. Foram analisados ainda três tipos de operadores de recombinação: *BLX- α* , *Naive* e *Uniforme*; e dois de operadores de mutação: *randômico* e *não uniforme*. Os métodos e seus operadores foram avaliados segundo três medidas de eficiência: *Métrica C*, *Métrica S* e *Distancia das*

Soluções. Verificou-se que a melhor combinação de método-operadores, foi o NSGAI associado ao operador de mutação *Randômico*, com probabilidade de 5%, e operador de recombinação *BLX- α* , com probabilidade a 75%.

A metodologia proposta dividiu o processo de escolha da alternativa em duas etapas. Na primeira foram encontradas soluções que têm por característica pertencer à frente Pareto. Na segunda etapa foi feita a escolha de qual é a alternativa de maior preferência na opinião do decisor. Considerando esses condicionantes, efetuou-se uma série de simulações para diferentes configurações de funções objetivo. Um dos objetivos desse estudo foi encontrar a configuração do problema com a menor quantidade de objetivos que possa melhor extrair, no que diz respeito à confiabilidade, as características da rede de modo a subsidiar a tomada de decisão. Para as redes avaliadas foram gerados dois conjuntos não dominados. Para o primeiro considerou-se como funções objetivo o custo, a entropia, a resiliência e os vazamentos, o segundo, o custo, a resilientropia e os vazamentos. As outras funções empregadas neste trabalho, que servem como medida alternativa da confiabilidade, foram calculadas posteriormente, a partir das soluções encontradas para as frentes Pareto.

Com relação ao comportamento das funções objetivo empregadas, observou-se que para todos os casos, com exceção da rede RF1 com locação de VRPs, uma tendência de crescimento das funções custo, vazamento e resiliência/resilientropia aproximadamente exponencial. As funções *efeito do envelhecimento*, *expansibilidade* e *tolerância* apresentaram comportamento linear com as demais medidas de confiabilidade, enquanto que a entropia não apresentou nenhuma relação os outros objetivos analisados.

Com base no resultado das 10 melhores soluções escolhidas, considerando como medidas de confiabilidade as funções resiliência-entropia, pode-se constatar que em apenas um caso, rede Dois Anéis, não houve uma definição de padrões que poderiam ser identificados para a escolha da solução de maior compatibilidade. O que implicou na escolha de redes diferentes quando se considera como medida de confiabilidade a resiliência-entropia e a tolerância. Para os outros sistemas, este comportamento não foi observado. Do ponto de vista hidráulico, as soluções também apresentaram comportamentos diferentes. Verificou-se a tendência, observada em processos de otimização apenas dos custos, do aparecimento de redes que tendem a serem ramificadas para algumas alternativas escolhidas no processo decisório.

Nos casos analisados, a adoção da função *resilientropia* fez com que as alternativas pertencentes à frente não-dominada, geradas considerando a mesma, tivessem comportamentos mais próximos entre si, resultando em redes com maiores níveis de

confiabilidade quando comparado com aquelas geradas utilizando a resiliência-entropia. Verificou-se ainda, que a resilientropia permitiu retratar de modo eficiente o comportamento da confiabilidade da rede, requerendo para isso uma quantidade muito menor de cálculo.

De um modo geral, foi apontada uma tendência de que os custos das redes escolhidas considerando o conjunto de critérios e pesos adotados são, em média, 20% superiores às da rede de mais econômicas.

Outra contribuição deste trabalho foi procurar adotar ainda na etapa do dimensionamento do sistema, a locação de VRPs como forma de se reduzir a quantidade de vazamentos na rede. A metodologia de locação proposta foi empregada no sistema RF1, que no dimensionamento sem a consideração destes componentes, apresentou índices de perda superiores a 50%. A locação das VRPs ainda no dimensionamento permitiu reduzir pela metade os vazamentos das redes escolhidas pelos métodos multicriteriais. É importante também salientar, que os valores mínimos de vazamentos não corresponderam às redes de menores custos. Pelo contrário, verificou-se uma tendência dos vazamentos diminuírem, à medida que as redes os custos da rede aumentavam.

Embora tenha funcionado a contento na maioria dos casos, a função resilientropia ainda precisa de alguns ajustes, de modo melhorar os resultados obtidos. Uma dificuldade encontrada, observada na rede Bessa, foi uma tendência de concentrar os “esforços” em uma distribuição perfeita nos nós que têm mais de três trechos adjacentes, relegando à segundo plano a influência dos outros nós da rede. Tal problema poderá ser sanado através de um ajuste dos limites adotados para os valores das entropias locais do método.

De forma geral, os métodos de otimização são muito sensíveis à forma como o problema é posto, podendo algumas vezes encontrar como maus resultados, não por causa da metodologia, mas pela forma como o problema foi construído. Tal dificuldade foi enfrentada na rede RF1. Para que o método proposto funcione de modo esperado, é preciso que a rede esteja bem posta, ou seja, que sejam identificados *a priori* como o sistema deverá funcionar, quais seriam os anéis principais da rede, quais os caminhos alternativos para a água fluir em caso de quebra, etc.

Não existe até o momento um método que faça todas as etapas do dimensionamento, e por isso, é muito importante a função do projetista no processo. Ele é fundamental para a obtenção de bons resultados, uma vez que serve de interface entre as várias etapas do projeto de redes, que vai desde o macro-planejamento até o cálculo das tubulações secundárias, dando ainda o seu aval às soluções encontradas pelos métodos de otimização. Assim, é importante que o projetista além da capacidade de entender o

problema físico de como a rede deve funcionar, tenha também noções do funcionamento dos métodos de otimização. Caso estas condições não sejam satisfeitas a eficiência do método proposto, por melhor que seja, estará limitada.

Constatou-se que, do ponto de vista dos métodos multicriteriais, não houve diferença significativa entre as soluções obtidas pelo método ELECTRE III e PROMETHEE. Embora o PROMETHEE tendesse a apresentar soluções de menores custos, fato creditado à falta de uma função veto para este método.

Pode-se considerar que este trabalho atendeu a todos os objetivos propostos contribuindo para o aprimoramento das metodologias de dimensionamento de redes de distribuição de água. Podem-se considerar como contribuições mais relevantes deste trabalho: o método em si que une uma técnica eficiente de geração de alternativas a métodos multicriteriais; o desenvolvimento de um modelo de simulação hidráulico que considerasse ao mesmo tempo a demanda dependente da pressão e os vazamentos, dentro da estrutura do mesmo; o desenvolvimento da função resiliëntropia, que mostrou-se eficiente de cálculo da confiabilidade dos sistemas; e, a locação de válvulas ainda no processo de dimensionamento.

Consideram-se como futuros passos a serem tomados no sentido de tentar a metodologia proposta exequível, o aprimoramento da função resiliëntropia de modo a melhorar o seu funcionamento quando para nós com mais de três trechos adjacentes. Seria interessante também o desenvolvimento de um método de definição de layout, que pudesse auxiliar na determinação da disposição dos trechos no modelo computacional.

De modo a tornar a metodologia mais robusta, recomenda-se a sua aplicação a outras redes de distribuição de água, de modo a refinar o processo identificando outras dificuldades não detectadas. Merece também uma investigação mais aprofundada no modo de locação de VRPs, proposto nesta tese, de modo a tornar o processo mais rápido, e /ou aperfeiçoar a determinação das cargas de serviço destas válvulas.

Do ponto de vista do processo de decisão uma análise de sensibilidade dos parâmetros (indiferença, preferência, veto e peso), de modo a subsidiar uma forma de definição dos mesmos. Principalmente levando-se em conta que o decisor será uma pessoa não especializada no assunto.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGGARWAL, K. (1993) *Reliability Engineering*. Kluwer Academic Publishers, Boston.
- AHUJA, K. R., MAGNANTI, T. L. e ORLIN, J. B. (1993) *Network Flows: Theory, Algorithms, and Applications*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- ALONSO, J. M. , ALVARRUIZ, F. , GUERRERO, D. et al. : (2000) *Parallel Computing in Water Network Analysis and Leakage Minimization*. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, v. 126, n. 4 p. 251-260.
- ALPEROVITS, E. e SHAMIR, U. (1977) *Design of optimal water distribution systems*. Water Resources Research, v. 13, n. 6, p. 885-900.
- ANDERSSON, J. (2001) *Multiobjective Optimization in Engineering Design*. PhD Thesis, Linkspings University, Division of Fluid and Mechanical Engineering Systems, Linkasping, Sweden
- AWUMAH, K., GOULTER, I., e BHATT, S. K. (1991) *Entropy-Based Redundancy Measures in Water Distribution Design*. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, v. 117, n. 5, p. 595-614.
- BAO, Y. e MAYS, L. W. (1990) Model for Water Distribution System Reliability. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, v. 116, n. 9, p. 1119-1137.
- BARRETT, R., M. BERRY, T. F. CHAN, et. al. (1994) Templates for the Solution of Linear Systems: Building Blocks for Iterative Methods. SIAM.
- HOBBS, B.F. e BEIM, G.K. (1988) *Analytical simulation of water system capacity reliability, 2. A Markov chain approach and verification of the models*. Water Resources Research, v. 24, n. 9.
- BENSON, H. P. 1978 Existence of Efficient Set for Strictly Quasiconcave Sets. Journal of optimization Theory and Application, v. 26, n. 4, 569-580.
- BHAVE (1979) Selecting Pipe Sizes in Network Optimization by LP. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, v. 105, n. 8, p. 1019-1025.
- BHAVE, P. R. (1983a) Optimization of Gravity-Fed Water Distribution Systems: Theory. Journal of Environmental Engineering, ASCE, v. 109, n. 1, p. 189-205.
- BHAVE, P. R. (1983b) *Optimization of Gravity-Fed Water Distribution Systems: Application*. Journal of Environmental Engineering, ASCE, v. 109, n. 2, p. 383-395.
- BHAVE P. R. e GUPTA R. (1994) *Reliability Analysis of Water-Distribution Systems*, Journal of Environmental Engineering, ASCE, v. 120, n. 2, p. 447-460
- BOUCHART, F. , e GOULTER, I. C. (1991) *Reliability improvements in design of water distribution networks recognizing valve location*. Water Resources Research, v. 27, n. 12, p. 3029-3040.
- BOX, G. E. P. (1957) *Evolutionary operation: a method of increasing industrial productivity*. Applied Statistics, v. 6, p. 81-101.
- BOWMAN, V.J.. (1976) *On the Relationship of the Tchebycheff Norm and the Efficient Frontier of Multiple-Criteria Objectives*. In THIERIEZ, H. (ed.), Multiple Criteria Decision Making, volume 130 of Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, Springer-Verlag, Berlin.

- BRAGA B. P. F. e GOBETTI L. E. C. (1997) Análise Multiobjetivo. In PORTO, R. L. Técnicas quantitativas para o gerenciamento de Recursos Hídricos, Coleção ABRH v. 6, ABRH, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, p. 361-420.
- BRANS, J. P.; VINCKE, P. H. (1985) *A Preference Ranking Organization Method, the PROMETHEE Method for MCDM*. Management. Science., v. 31, p. 647-656,
- BRINCKLE, T. (1996) *Theory of Evolutionary Algorithms and Application to Systems Synthesis*. Doctor Thesis, University of Saarbrücken, Alemanha.
- BUCHANAN, J, SHEPPARD, P e VANDERPOOTEN, D. (1999) *Project ranking using Electre III*. University of Waikato, Department of Management Systems, Research Report Series 1999-01, Hamilton, New Zeland.
- CENEDESE A. e GALLERANO (1987) *Multiobjective Analysis in Optimal Solution of Hydraulic Networks*. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, v. 113, n. 9, p. 1133-1143
- CHANDAPILLAI, J. (1991) *Realistic Simulation of Water Distribution System*. Journal of Transportation Engineering, ASCE, v. 117, n. 2. , p. 258-263.
- CHASE, D. V. (2000) *Operation of Water Distribution Systems*. In: MAYS, L. W. *Water Distribution Systems Handbook*, McGraw-Hill, p. 15.1-15.16.
- CHEUNG, P. B. (2001) *Investigação dos Métodos Clássicos de Calibração de Redes Hidráulicas*. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, Mato Grosso do Sul.
- CHEUNG, P. B. (2004) *Análise de Reabilitação de Redes de Distribuição se Água para Abastecimento via Algoritmos Genéticos Multiobjetivo*. Tese de Doutorado, Departamento de Hidráulica e Saneamento, Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo.
- SILVA, F. G. B. (2003) *Estudos de calibração de redes de distribuição de água através de algoritmos genéticos*. Tese de Doutorado, Departamento de Hidráulica e Saneamento, Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo.
- COELLO, C. A. C. (1996) *An Empirical Study of Evolutionary Techniques for Multiobjective Optimization in Engineering Design*. PhD thesis, Department of Computer Science, Tulane University, New Orleans, Louisiana.
- COELLO, C. A. C. (1999) *An Updated Survey of Evolutionary Multiobjective Optimization Techniques : State of the Art and Future Trends*. In: 1999 Congress on Evolutionary Computation, pages 3-13, Vol. 1, Washington, D.C., July 1999.
- COHON, J. L. (1978) *Multiobjective Programming and Planning*. Academic Press. San Diego, California.
- COHON, J. L. e MARKS, D. H. (1975) *A Review and Evaluation of Multiobjective Programming Techniques*. Water Resources Ressearch, v. 11, n. 2, p. 208-219,
- CONEJO J. G. L. , LOPES A. R. G. , e MARCKA, E. (1999a) *Recomendações Gerais e Normas de Referência para Controle de Perdas nos Sistemas Públicos de Abastecimento do Programa*. Plano Nacional de Combate ao Desperdício de Água (PNCDA), Secretaria Especial de Desenvolvimento Urbano, Brasília, DF.
- CONEJO J. G. L. , LOPES A. R. G. , e MARCKA, E. (1999b) *Medidas de Redução de Perdas: elementos para planejamento*. Plano Nacional de Combate ao Desperdício de Água (PNCDA), Secretaria Especial de Desenvolvimento Urbano, Brasília, DF.

- CORTES-ARREGUIN, F. I. e OCHOA-ALEJO, L. (1997) *Evaluation of Water Losses in Distribution Networks*. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, v. 123, n. 5, p. 284-291.
- COSTA, A. L. H., MEDEIROS, J. L. e PESSOA, F. L. P (2001) *Optimization of Water Distribution Networks Through a Reduced Space Branch-And-Bound Search*. Water Resources Research, v.37, n.4, p.1083 - 1090.
- CROSS H. (1936) *Analysis of Flow in Networks of Conduits or Conductors*. Bulletin Nº 286, University of Illinois, Engineering Experimental Station.
- CULLINANE, M. J. (1986) *Hydraulic Reliability of Urban Water Distribution Systems*. Proceedings of Water Forum '86, ASCE, pp. 1264-1271
- CULLINANE, M. J. (1989) *Determining Availability and Reliability of Water Distribution Systems*. In: MAYS L. W. Reliability Analysis of Water Distribution Systems, ASCE, p. 190-246.
- CULLINANE, M. J., GOODRICH e GOULTER, I. (1989) *Water Distribution System Evaluation*. In MAYS, L. W. Reliability Analysis of Water Distribution System, ASCE, p. 85-122.
- CULLINANE, M. J., LANSEY, K. E. e MAYS, L. W. (1992) *Optimization-availability-based design of water distribution networks*. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, v. 118, n. 3, p. 420-441.
- CUNHA, M. C. C. (2000) *Métodos Numéricos*. 2ª Edição. Editora da UNICAMP, Campinas, São Paulo.
- CUNHA M. C. e SOUZA, J. (1999) *Water Distribution Network Design Optimization: Simulated Annealing Approach*. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, v. 125, n. 4, p. 215-221
- DATTA, R. S. N. e SRIDHARAN, K. (1994). *Parameter Estimation in Water-Distribution Systems by Least Squares*. Journal of Water Resources Planning and Management, v. 120, n. 4, p. 405-422
- DEB A. K. (1976) *Optimization of Water Distribution Network Systems*. Journal of the Environmental Engineering Division, ASCE, v. 102, n. 4, p. 837-851
- DEB, K. (2001) *Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms*. John Willey & Sons, Chichester, Inglaterra.
- DEB A. K. e SARKAR, A. K. (1971) *Optimization in Design of Hydraulic Network*. Journal of the Sanitary Engineering Division, ASCE, v. 97, n. 2, p. 141-159
- DEB, K. , AGRAWAL, S. , PRATAB, A. e MEYARIVAN, T. (2000) *A Fast Elitist Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm for Multi-Objective Optimization: NSGA-II*. In M. SCHOENAUER, K. DEB, G. RUDOLPH, X. et al, Proceedings of the Parallel Problem Solving from Nature VI Conference, p. 849-858.
- DEJONG, K. A. (1975) *An Analysis of Behavior of a Class of Genetic Adaptive Systems*. Ph. D. Thesis, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan, 1975. University of Michigan, Ann Arbor, Michigan.
- DEJONG, K. e SPEARS, W. (1993). *On the State of Evolutionary Computation*. Proceedings of the Fifth ICGA, Kaufmann, San Mateo, California, EUA, p. 618-623.
- DORIGO, M., MANIEZZO, V., e COLORNI, A. (1991) *Positive Feedback as a Search Strategy*. Technical Report No. 91-016, Politecnico di Milano, Milão Itália.

- DUAN, N. , MAYS, L. W. e LANSEY, K. E. (1990) *Optimal reliability-based design of pumping and distribution systems*. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, v. 116, n. 2, p. 249-267.
- EBERHART AND KENNEDY (1995) - SFLA
- EDGEWORTH, F. Y. (1881) *Mathematical Psychics: An essay on the application of mathematics to the moral sciences*. Kegan Paul & Co. Londres, Inglaterra.
- EDWARDS, W. (1977). *How to Use Multiattribute Utility Measurement for Social Decision Making*. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, vol. 7, p. 326-340.
- EIGER, G., SHAMIR, U. e BEM-TAL, A. (1994) *Optimal Design of Water Distribution System*. Water Resources Research, AGO, v. 30, n. 9, p. 2937-2946.
- ESHELMAN, L. J. , SCHAFFER J. D. (1991) *Real-Coded Genetic Algorithm and Interval-Schemata*. Foundations of Genetic Algorithms 2, p. 187-202.
- EUSUFF, M. M. e LANSEY, K. E. (2001) Water Distribution Network Design Using the Shuffled Frog Leaping Algorithm. Proceeding of Bridging the Gap: Meeting the World's Water and Environmental Resources Challenges, ASCE.
- EUSUFF, M. M. e LANSEY, K. E. (2003) *Optimization of Water Distribution Network Design using the Shuffled Frog Leaping Algorithm*. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, v. 129, n. 3, p. 210-225.
- FIACCO, A. V. e MACCORMICK, G. P. (1968) *Nonlinear Programming-sequential Unconstrained Minimization Techniques*. John Willey & Sons, Chichester, Inglaterra.
- FRIEDMAN, R., ANSELL, C., DIAMOND, S. e HAIMES, Y. Y.. (1984). *The Use of Models for Water Resources Management, Planning and Policy*. Water Resources Research, v. 20, n.7, p. 793-802.
- FORMIGA, K. T. M. (1999) *Otimização de Redes Malhadas Utilizando a Programação Não Linear*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, Paraíba..
- FORMIGA, K. T. M. , e CHAUDHRY, F. H. (2002) *Utilização de Algoritmos Evolucionários Multi-Objetivos no Dimensionamento de Redes de Distribuição de Água*. Anais do Seminário de Projeto, Planejamento e Operação de Redes de Distribuição (CD-ROM). João Pessoa, Paraíba.
- FORMIGA, K. T. M e GOMES, H. P. (1999) *Otimização de Redes Malhadas Abastecidas por Múltiplos Reservatórios*. Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, ABRH, Belo Horizonte, Minas Gerais.
- FORMIGA, K. T. M. ; CHAUDHRY, F. H. ; CHEUNG, P. B. et al. (2003a) *Métodos para Solução de Equações Lineares Empregados na Análise Hidráulica de Redes de Distribuição de Água*. In: XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Curitiba, Paraná.
- FORMIGA, K. T. M.; CHAUDHRY, F. H. ; CHEUNG, P. B. et al. (2003b) *Modelos para Análise Hidráulica de Redes de Distribuição de Água em Regime Permanente*. In: XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Curitiba, Paraná.
- FONSECA, C. M. e FLEMING, P. J. (1993) *Genetic Algorithms for Multiobjective Optimization: Formulation, Discussion and Generalization*. In S. Forrest (editor), Proceedings of the Fifth International Conference on Genetic Algorithms, San Mateo, California p. 416-423.

- FRASER, A. S. (1957) *Simulation of genetic systems by automatic digital computers*. Australian Journal of Biological Science, v. 10, p. 484-491.
- FRANCATO, A. L. (2002) *Otimização Multiobjetivo da Operação de Redes Hidráulicas para Abastecimento de Água*. Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Civil, UNICAMP, Campinas, São Paulo.
- FUJIWARA, O.; JENCHAIMAHAKOON, B.; EDIRISINGHE, N. C. P. (1987) *A Modified Linear Programming Gradient Method for Optimal Design of Looped Water Distribution Networks*. Water Resources Research, v. 23, n. 6, p. 977-982.
- FUJIWARA, O. e DE SILVA, A. U. (1990) Algorithm for Reliability-Based Optimal Design of Water Networks. Journal of Environmental Engineering, ASCE, v. 116, n. 3, p. 575-587.
- FUJIWARA, O. e GANESHARAJAH, T. (1993) *Reliability assessment of water supply systems with storage and distributions networks*. Water Resources Research, v. 29, n. 8, p. 2917-2924.
- FUJIWARA, O. e LI, J. (1998) Reliability Analysis of Water Distribution Networks in Consideration Equity, Redistribution and Pressure Depend Demand. Water Resources Research, v. 34, n. 7, p. 1843-1850.
- FUJIWARA, O. e TUNG, H. (1991) *Reliability improvement for water distribution network through increasing pipe*. Water Resources Research, v. 27, n. 7, p. 1395-1402.
- GAMEIRO, R. C. P. G. (2003) *Dimensionamento otimizado de redes de distribuição de água com a utilização de algoritmos genéticos*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, Campo Grande, Mato Grosso do Sul.
- GASS, S.I. e SAATY T.L. (1955) *The Computational Algorithm For The Parametric Objective Function*. Naval Research Logistics Quarterly 2:39.
- GEN, M. e CHENG, R. (1997) Genetic Algorithms and Engineering Design. John Wiley & Sons, 1992
- GERMANOPOULOS, G. (1985) *A Technical Note on the Inclusion of Pressure Dependent Demand and Leakage Terms in Water Supply Networks Models*. Civil Engineering Systems, v. 2, n. 3, p. 171-179.
- GERMANOPOULOS, G. e JOWITT, P. W. (1989) *Leakage reduction by excessive pressure minimization in a water supply network*. Proc. Institution. Civil Engineers, Part 2, 87, p. 195-214.
- GESSLER J. (1985) Pipe network optimization by enumeration. Proceedings of computer applications for water resources, ASCE, New York, p. 572-581.
- GILL, P.E., MURRAY, W. e WRIGHT, M.H. (1984) *Practical Optimization*., Academic Press, London.
- GRANADOS, A. (1990) *Infraestructuras de Regadíos - Redes Colectivas de Riego a Presión*. Servicio de Publicación de E.T.S.I. de Caminos de la Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, Espanha.
- GOICOECHEA, A. HANSEN, D. R. e DUCKSTEIN, L. (1982) *Multiobjective Decision Analysis with Engineering and Business Application*. John Wiley & Sons, New York, New York, p. 258.

- GOLDBERG, D. E. (1989) *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Massachusetts.
- GOLDMAN, F. E., SAKARYA, A. B. A. ORMSBEE, L. E., UBER, J. G. (2000) *Optimization Models for Operations* In: MAYS, L. W. *Water Distribution Systems Handbook*, McGraw-Hill, p. 4.1-4.28.
- GOULTER, I. C. (1992) *Systems Analysis Water-Distribution Network Design: from Theory to Practice*. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, v. 118. n. 3. p. 238-248.
- GOULTER, I. (1995) *Analytical and Simulation Models for Reliability Analysis in Water Distribution Systems*. in: CABRERA, E. e VELA, A. F. : *Improving Efficiency and Reliability in Water Distribution Systems*. Kluwer Academics Publishers, p. 235-266.
- GOULTER, I. C, WALSKI, T. M., MAYS, L. W. et al. (2000) *Reliability Analysis for Design*. In: MAYS, L. W. *Water Distribution Systems Handbook*, McGraw-Hill, p. 18.1-18.52.
- GOULTER, I. C. e COALS, A. (1986) *Quantitative approaches to reliability assessment in pipe networks*. *Journal of Transports Engineering*. , ASCE, v. 112, n. 3, p. 287-301.
- GUPTA, R. e BHAVE, P. R. (1996) *Comparison of Methods for Predicting Deficient-Network Performance*. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, v. 122, n. 3, p. 214-217.
- HALHAL, D., Walters, G. A., OUZAR, D., e SAVIC, D. A. *Water Network Rehabilitation with Structured Messy Genetic Algorithm*. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, v. 123, n. 3, p. 137-146.
- HANSEN, C. T., MADSEN, K. e NIELSEN H. B. (1991) *Optimization of Pipe Networks*. *Mathematical Programming*, v.. 52, n. 1, p. 45-58.
- HASTENES, M. R. e STIEFEL, E. (1952) *Methods of Conjugate Gradients for Solving Linear Systems*. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, n 49, p. 409-436.
- HIMES, Y. Y. , LASDON, L. S. e WISMER, D. A. *On a Bicriterion Formulation of the Problems of Integrated Systems Optimization*. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, v.1, p. 53-69.
- HOBBS, B.F. e BEIM, G.K. (1988) *Analytical Simulation of Water System Capacity Reliability, 1, Modified Frequency-Duration Analysis*, *Water Resources Research*, v. 24, n. 9. p. 1431-1444
- HOLLAND, J. H. (1975) *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. Ann Arbor, Michigan: The University of Michigan Press.
- HORN, J. , NAFPLIOTIS, N. e Goldberg, D. E. (1994) *A Niche Pareto Genetic Algorithm for Multiobjective Optimization*. In *Proceedings of the First IEEE Conference on Evolutionary Computation*, IEEE World Congress on Computational Intelligence, Volume 1, Piscataway, New Jersey, p. 82-87.
- HWANG, C.L. e YOON, K.. (1981) *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*. Springer-Verlag, Berlin.
- ISAACS, L. T. e MILLS, K. G. (1980) *Linear Theory Method for Pipe Network Analysis*. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, v. 106, n. 7, p. 1191-1201.

- JACOBY, S. L. S. (1968) *Design of Optimal Hydraulic Networks*. Journal of Hydraulics Division, ASCE, v. 94, n. 3, p. 641-666.
- JASZKIEWICZ, A. *Multiobjective Methods Metaheuristic Library for C++*. <http://www-idss.cs.put.poznan.pl/~jaszkiewicz/MOMHLIB/>. Acessada em 22/02/2005
- JASZKIEWICZ A., (2001) *Multiple objective metaheuristic algorithms for combinatorial optimization*. Habilitation thesis, 360, Poznan University of Technology, Poznan, Polonia.
- JOWITT, P. W. e XU, C. (1990) *Optimal valve control in water-distribution networks*. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, v. 116 n. 4, p. 455-472.
- KAPELAN, Z. S., SAVIC, D. A. e WALTERS, G. A. (2003) *Multiobjective Sampling Design for Water Distribution Model Calibration*. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, v. 129, n. 6, p. 466-479.
- KAPUR, J. N. e KESAVAN, H. K. (1992) *Entropy Optimization Principles and Their Applications*. In: SINGH, V. P. e FIORENTINO, M. Entropy and Energy Dissipation in Water Resources. Water Science and Technology Library, v 9, Kluwer Academics Publishers. p. 1-25.
- KARMELI, D., GADISH, Y. e MEYERS, S. (1968) Design of Optimal Water Distribution Networks. Journal of Pipeline Division, ASCE, v. 94, n. 10, p. 1-10.
- KESSLER, A. e SHAMIR, U. (1990) *Analysis of the Lienar Programming Gradient Method for Optimal Design of Water Supply Networks*. Water Resources Research, AGO, v. 25, n. 7, p. 1469-1480.
- KERSHAW, D. (1978) *The Incomplete Cholesky-Conjugate Gradient Method for Iterative Solution of Systems of Linear Equations*. Journal of Computational Physics, n. 26, p. 43-65
- KNOWLES, J. D. e Come, D. W. (2000) *Approximating the Nondominated Front Using the Pareto Archived Evolution Strategy*, Evolutionary Computation, v. 8 n 2 p. 149-172.
- KUHN, H.W., e TUCKER, A.W. (1951) *Nonlinear Programming*. In: NEYMAN, J., ed. Proceedings of the Second Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability. University of California Press, Berkeley, California, 481-492.
- LACERDA, E. G. M. ; CARVALHO, A. C. P. L. F. (1999) *Introdução aos Algoritmos Genéticos*. In: GALVÃO, C. O. (org.); VALENÇA, M. J. S. (org.): *Sistemas Inteligentes: aplicações a recursos hídricos e sistemas ambientais*. Ed. Universidade/UFRGS/ABRH, Porto Alegre, p. 99-150. (Coleção ABRH de Recursos Hídricos; 7.)
- LAMBERT, A. O. e HIRNER, W. H. (1999) *Losses from Water Supply Systems: Standard Terminology and Recommended Performance Measures*. IWA Blue Pages.
- LANSEY, K. E. e BASNET, C. (1991). *Parameter Estimation for Water Distribution Networks*. Journal of Water Resources Planning and Management, v. 117, n. 1, p. 126-144.
- LANSEY, K., DUAN, N., MAYS, L. W. e TUNG, Y. -K. (1989) *Water distribution system design under uncertainty*. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, v. 115 n. 5, p. 630-645.

- LANSEY, K. e MAYS, L. W. (2000) *Hydraulics of Water Distribution Systems*. In: MAYS, L. W. *Water Distribution Systems Handbook*, McGraw-Hill, p. 4.1-4.28.
- LASDON, L., WAREN, A., JAIN, A. e RATNER, M. (1978) *Design and testing of a generalized reduced gradient code for nonlinear programming*. *ACM Transactions on Mathematical Software*, v. 4, n. 1, p. 34-50.
- LEAL, A. F. (1995) *Estudo Comparativo de Métodos de Otimização de Redes Malhadas Pressurizadas*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, Paraíba.
- LIONG, S. Y. e ATIQUZZAMAN, M. (2004) *Optimal Design of Water Distribution Network Using Shuffled Complex Evolution*. *Journal of The Institution of Engineers, Singapore*, v. 44 n. 1, p. 93-107.
- LOPES, A. V. (2002) *Otimização do Dimensionamento e Análise de Confiabilidade de Redes de Distribuição de Água*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, Distrito Federal.
- LOGANATHAN, G. V., GREENE, J. J., e AHN, T. J. (1995) *Design Heuristic for Globally Minimum Cost Water-Distribution Systems*. *Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE*, v. 121, n. 2, pp. 182-192.
- MAIER, H. R., SIMPSON, A. R., ZECCHIN, A. C., FOONG, W. A. et al. (2001) *Ant Colony Optimization for Design of Water Distribution Systems*. *Proceedings of Bridging the Gap: Meeting the World's Water and Environmental Resources Challenges, ASCE*.
- MAIER, H. R., SIMPSON, A. R., ZECCHIN, A. C., FOONG, W. A. et al. (2003) *Ant Colony Optimization for Design of Water Distribution Systems*. *Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE*, v. 129, n. 3, p. 200-209.
- MARTÍNEZ, F., CONEJOS, P. e VERCHER, J. (1999) *Developing an Integrated Model for Water Distribution Systems Considering both Distributed Leakage and Pressure-Dependent Demands*. *Proceedings of the 26th ASCE Water Resources Planning and Management Division Conference*.
- MAYS, L. W. (2002) *Urban Water Infrastructure: A Historical Perspective*. In: MAYS, L. W. *Urban Water Supply Handbook*, McGraw-Hill, New York. p. 1.3-1.66.
- MAYS, L. W., TUNG, Y. K., e CULLINANE, M. (1989) *Methods for Component Reliability Analysis*. In: MAYS L. W. : *Reliability Analysis of Water Distribution Systems*. ASCE, p. 163-182.
- MELO, D. P. (2000) *Otimização de Redes Malhadas Abastecidas com Múltiplos Reservatórios, Bombas e Boosters Através da Programação Não Linear*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, Paraíba.
- MENDES, A. S (1999) *Algoritmos Meméticos Aplicados aos Problemas De Sequenciamento em Máquinas*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, Universidade de Campinas, Campinas, São Paulo.
- MICHALEWICZ, Z. (1992) *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*. Springer-Verlag, Berlin.
- MIETTINEN, K. M. (1999) *Nonlinear Multiobjective Optimization*. *International Series in Operations Research & Management Science 12*, Kluwer Academic Publishers, Boston.

- MIETTINEN K. M. e SALMINEN, P. (1999) *Decision-Aid for Discrete Multiple Criteria Decision Making Problems with Imprecise Data*. European Journal of Operational Research, v. 119, p. 50-60.
- MONTESINOS, P., GUZMAN, A. G. e AYUSO J. L. (1999) Water Distribution Network Optimization Using a Modified Genetic Algorithm. Water Resources Research, v. 35, v. 11, p. 3467-3473.
- MORGAN, D. R. e GOULTER, I. C. (1985) *Optimal Urban Water Distribution Design*. Water Resources Research, v. 21, v. 5, p. 642-652.
- NEUMAIER A. (2001) *Constraint Global Optimization*. In COCONUT. Algorithms for Solving Nonlinear Constrained and Optimization Problems: The State of the Art, p. 55-113.
- NEUFVILLE, R., SCHAAKE, J. e STAFFORD, J. H. (1971) Systems Analysis of Water Distribution Networks. Journal of the Sanitary Engineering Division, ASCE, v. 97, n. 6, p. 825-842.
- NIELSEN, H. B. (1989) *Methods for Analyzing Pipe Networks*. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, v. 125, n. 2, p. 139-157.
- National Water Council (1980) *Leakage Control, Policy and Practice*. NWC, Standing Technical Committee, Report No DWI0190.
- ORMSBEE, L. E. (1989). *Implicit Network Calibration*. Journal of Water Resources Planning and Management, v. 115, n. 2, p. 243-257.
- ORMSBEE, L. E. e WOOD, D. J. (1986). *Explicit Pipe Network Calibration*. Journal of Water Resources Planning and Management, v. 112, n. 2, p. 166-182.
- PARETO, V. (1886) *Cours D'Economie Politique*, Volume 1. Lausanne: F. Rouge.
- PHILIP, J. (1972) *Algorithms for the Vector Maximization Problem*. Mathematical Programming, v.2, p. 207-229.
- PORTO, R. M.: (1998). *Hidráulica Básica*. 1ª ed., Edusp, São Carlos.
- PRASSAD T. D. e PARK, N-S (2004) *Multiobjective Genetic Algorithms for Design of Water Distribution Networks*. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, v. 130, n. 1, p. 73-82.
- QUARTERONI, A., SACCO, R. e SALERI, F. (2001) *Numerical Mathematics*. Text in Applied Mathematics 37. Springer-Verlag, Berlin.
- QUINDRY, G. E., BRILL, E. D., LIEBMAN, J. C. e ROBINSON, A. R. (1979) *Comment on 'Design of optimal water distribution systems'* por ALPEROVITS, E. e SHAMIR, U.. Water Resources Research, AGO, v. 15, n. 6, p. 1651-1654.
- QUINDRY, G., BRILL, E. D., e LIEBMAN, J. C. (1981) *Optimization of looped distribution systems*. Journal of Environmental Engineering, ASCE, v. 107, n. 4, p. 665-679.
- REDDY, L. e ELANGO, K. (1989) *Analysis of Water Distribution Networks with Head Dependent Outlets*. Civil Engineering Systems. v. 6, n. 3, p. 102-110.
- REDDY, P. V. N.; SRIDHARAN, K. e RAO, P. V. (1996). *WLS Method for Parameter Estimation in Water Distribution Networks*. Journal of Water Resources Planning and Management, v. 122, n. 3, p. 157-164.

- REIS, L. F. R. , PORTO, R. M. e CHAUDHRY, F. H. (1997) *Optimal Location of Control Valves in Pipe Networks by Genetic Algorithm*. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, v. 123, n. 6 317-326.
- RIGHETTO, A. M. (2001). *Calibração de Modelo Hidráulico de Rede de Distribuição de Água*. Revista ABRH, v. 6, n. 3, p. 33-44.
- ROGERS, P. P. e FIERING, M. B. (1986) *Use of Systems Analysis in Water Management*. Water Resources Research, v. 22, n. 9, pp. 146-158.
- ROSENTHAL, A. (1977) *Series-Parallel Reduction for Difficult Measures of Network Reliability*. Networks, v. 11, n. 4, p. 323-334.
- ROWELL, W. F. e BARNES, J. W. (1982) *Obtaining the Layout of Water Distribution Systems*. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, v. 108 n. 1, p. 137-148.
- ROY, B. (1968) *Classement et Choix en Présence de Critères Multiples (la méthode ELECTRE)*. RIRO, v. 8, p. 57-75.
- ROY, B. (1978) *ELECTRE III: Un Algorithme de Classements Fondé sur une Représentation Floue des Préférences en Présence de Critères Multiples*. Cahiers du Centre d'Etudes de Recherche Opérationnelle, v. 20, n. 1, p. 3-24.
- ROY B. e BERTIER, P. (1971) *La Méthode ELECTRE II*. Note de Travail 142, SEMA-METRA Metra International.
- RUDOLPH, G. (2001) *Evolutionary Search under Partially Ordered Fitness Sets*. In Proceedings of the International NAISO Congress on Information Science Innovations (ISI 2001), ICSC Academic Press: Millet/Sliedrecht p. 818-822.
- ROSSMAN, L. A. (2000) *EPANET 2: User's Manual*. U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati
- SAATY, T. L. *The Analytic Hierarchy Process*, New York: McGraw-Hill, 1977.
- SALGADO, R., TODINI, E. e O'CONNELL, P. E. (1987) *Comparisson of the Gradient Method with some Traditional Methods for the Analysis of Water Supply Distribution Networks*. International Conference on Computer Applications for Water Supply and Distribution, Leicester Polytechnic, p. 38-62.
- SALMINEN, P; HOKKANEN, J. e LAHDELMA, R. (1998) *Comparing Multicriteria Methods in the Context of Environmental Problems*. European Journal of Operational Research, v. 104, p. 485-496
- SATYANARAYANA, A. e WOOD, R. K. (1982) *Polygon-to-Chain Reductions and Networks Reliability*. Operations Research Center ORC 82-4, University of California, Berkeley.
- SAVIC, D. A. e WALTERS, G. A. (1997) *Genetic algorithms for least-cost of water distribution networks*. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, v. 123, n. 2, p. 67-77.
- SCHAFFER, J. D. *Multiple Objective Optimization with Vector Evaluated Genetic Algorithms*. PhD thesis, Vanderbilt University, Nashville, Tennessee, 1984.
- SCHITTKOWSKI, K., (1985) *NLQPL A FORTRAN-Subroutine Solving Constrained Nonlinear Programming Problems*. Annals of Operations Research, v. 5, p 485-500.
- SCHOTT, J.R.: (1995) *Fault Tolerant Design Using Multi-Criteria Genetic Algorithms*. Master's Thesis, Department of Aeronautics and Astronautics, Massachusetts Institute of Technology, Boston.

- SEN, P e YANG, J. B. (1998) *Multiple Criteria Decision Support in Engineering Design*. Springer-Verlag, Londres.
- SHANNON, C. (1948) *A Mathematical Theory of Communication*. Bell System Technical Journal, v. 27, n. 3, p. 379-423.
- SHERALI, H. D., TOTLANI, R. e LOGANATHAN, G. V. (1998) *Enhanced Lower Bounds For The Global Optimization of Water Distribution Networks*. Water Resources Research, v. 34, n. 7.
- SHAMIR, U. (1974) *Optimal Design and Operation of Water Distribution Systems*. Water Resources Research, v. 10, n. 1, p. 27-36.
- SHAMIR, U. e HOWARD, C. D. D. (1968) *Water Distribution Systems Analysis*. Journal of Hydraulics Division, ASCE, v. 94, n. 1, p. 219-234
- SHINSTINE, D. S., AHMED, I e LANSEY, K. E. (2002) Reliability/Availability Analysis of Municipal Water Distribution Networks: Case Studies. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, v. 128, n. 2, p. 140-151.
- SILVA, F. G. B. (2003) *Estudos de calibração de redes de distribuição de água através de algoritmos genéticos*. Tese de Doutorado, Departamento de Hidráulica e Saneamento, Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo.
- SILVA, R. M. A., Otimização Baseada em Colônia de Formigas Aplicada ao Problema de Cobertura de Conjuntos. Tese de Doutorado, Centro de Informática da Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Pernambuco.
- SILVA, R. T. , CONEJO J. G. L. (1998) *Definições de Perdas nos Sistemas Públicos de Abastecimento de Água*. Plano Nacional de Combate ao Desperdício de Água (PNCDA), Secretaria Especial de Desenvolvimento Urbano, Brasília, Distrito Federal.
- SIMPSON, A. R., DANDY, G. C. e MURPHY, L. J. (1994) *Genetic algorithms compares to other techniques for pipe optimization*. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, v. 120, n. 4. p. 423-443.
- SOARES, A. K. (2003) *Calibração de Modelos de Redes de Distribuição de Água para Abastecimento Considerando Vazamentos e Demandas Dirigidas pela Pressão*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Hidráulica e Saneamento, Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo.
- SOARES, A. K., CHEUNG, P. B., REIS, L. F. R. et al. (2004) *Avaliação das Perdas Físicas de um Setor da Rede de Abastecimento de Água de Campo Grande-MS via Modelo Inverso*. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 9, n. 4, p. 312-321.
- SOARES, A. K.; REIS, L. F. R. (2004) *Calibração de Modelos de Redes de Distribuição de Água Utilizando Modelo de Simulação Hidráulica Dirigido pela Pressão (MSHDP) e Método Híbrido AG-Simplex*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 9, n. 2, p. 85-96.
- SOARES, A. K.; REIS, L. F. R.; CARRIJO, I. B. (2003) *Head-Driven Simulation Model (HDSM) for Water Distribution System Calibration*. In: MAKSIMOVIC, C., BUTLER, D., MEMON, F. A.. (Org.). *Advances in Water Supply Management*. Lisse, The Netherlands, p. 197-207.
- SOI, I. M. e AGGARWAL, K. K. "A review of computer-communication network classification schemes", IEEE Communications Magazine, vol. 19, no. 2, March 1981 pp. 24-32

- SOUZA, R. S. (1994) *Aspectos computacionais da análise de redes de distribuição de água com componentes hidráulicos em regime permanente*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Hidráulica e Saneamento, Universidade de São Paulo, São Carlos São Paulo.
- SOUZA, R. S., CHAUDHRY, F. H., VAL, L. A. A. e POLIZER, M. (2000) *Análise de Redes de Distribuição de Água Usando o Método da Teoria Linear e Newton-Raphson Combinados*. Anais do IX Simpósio Luso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Porto Seguro, BA, p. 383-39
- SRINIVAS, N. e DEB, K. (1994) *Multiobjective Optimization Using Nondominated Sorting in Genetic Algorithms*. *Evolutionary Computation*, v. 2 n. 3 p. 221-248.
- STERLING, M. J. H. e BARGIELA, A. (1984). *Minimum-Norm State Estimation for computer Control of Water Distribution Systems*. *Proc. IEEE, Part D*, v. 131, p. 57-63.
- SU, Y. , MAYS, L. W. , DUAN, N. e LANSEY, K. E. (1987) *Reliability-Based Optimization Model for Water Distribution Systems*. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, v. 114, n. 12, p. 1539-1555.
- SWAMEE, P. K. e JAIN, A. K. (1976) *Explicit Equations for Pipe-Flow Problems*. *Journal of Hydraulics Division, ASCE*, v. 102, n. 5, p. 627-664.
- TAKEDA, E. (2001) *A Method for Multiple Pseudo-criteria Decision Problems*. *Computers and Operations Research*, v. 28, p. 1427-1439.
- TANYIMBOH, T. T., TABESH, M. e BURROWS, R.; *Appraisal of source head methods for calculating reliability of water distribution networks*. *Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE*, v. 127 n. 4, p. 206-213.
- TANYIMBOH, T.T., TEMPLEMAN, A.B. (1993) *Maximum Entropy Flows for Single-Source Network*. *Engineering Optimization*, v. 22, p. 49-63
- TANYIMBOH, T.T., TEMPLEMAN, A.B. (2000) *A Quantified Assessment of Relationship Between the Reliability and Entropy of Water Distribution Systems*. *Engineering Optimization*, v. 33, p. 179-199.
- TICONA, W. G. C. (2003) *Aplicação de Algoritmos Genéticos Multi-Objetivo para Alinhamento de Sequências Biológicas*. Instituto de Ciências Matemáticas e Computação, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP
- TODINI, E. (2000) *Looped Water Distribution Networks Design Using a Resilience Index Based Heuristic Approach*. *Urban Water*, Vol. 2, n.3, p. 115-122.
- TOLSON, B. A., MAIER, H. R., SIMPSON, A. R. e LANCE, B. J., 2004 *Genetic Algorithms for Reliability-Based Optimization of Water Distribution Systems*. *Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE*, v. 130, n. 1, p. 63-72.
- TUCCIARELLI, T. CRIMINISI, A. e TERMINI, D. (1989) *Leak Analysis in Pipeline Systems by Means of Optimal Valve Regulation*. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, v. 125, n. 3, p. 277-285.
- TUNG, Y. K., MAYS, L. W., e CULLINANE, M. (1989) *Reliability Analysis Systems*. In: MAYS L. W. *Reliability Analysis of Water Distribution Systems*. ASCE, 260-297.

- VAIRAVAMOORTHY, K. e LUMBERS, J. (1998) *Leakage Reduction in Water Distribution Systems: Optimal Valve Control*. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, v. 124, n. 11, p. 1146-1154.
- VARMA, K. V. K., NARASIMHAN, S. e BHALLAMUDI, S. M. (1997) Optimal Design of Water Distribution Systems Using an NLP Method. Journal of Environmental Engineering, ASCE, v. 123, n. 4, p. 381-388.
- VELDHUIZEN, D. A. Van. (1999) *Multiobjective Evolutionary Algorithms: Classifications, Analyses, and New Innovations*. PhD thesis, Department of Electrical and Computer Engineering. Graduate School of Engineering. Air Force Institute of Technology, Wright-Patterson AFB, Ohio, p. 270.
- VELDHUIZEN, D. A. Van e LAMONT, G. B. (1998) *Multiobjective Evolutionary Algorithm Research: A History and Analysis*. Technical Report TR-98-03, Department of Electrical and Computer Engineering, Graduate School of Engineering, Air Force Institute of Technology, Wright-Patterson AFB, Ohio, p. 88
- VINCKE, P., GASSNER, M. e ROY, B. (1992) *Multicriteria decision-aid*. John Wiley & Sons, 1992.
- WAGNER, J. M. , SHAMIR, U. e MARKS, D. H. (1998a) *Water Distribution Reliability: Simulation Methods*. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, v. 114, n. 3, p. 253-275.
- WAGNER, J. M., SHAMIR, U. e MARKS, D. H. (1998b) *Water Distribution Reliability: Analytical Methods*. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, v. 114, n. 3, p. 276-292.
- WALSKI, T. M. (1983). *Technique for Calibrating Network Models*. Journal of Water Resources Planning and Management, v. 109, n. 4, p. 360-372.
- WALSKI, T. M., (1984) *Analysis of Water Distribution Systems*. Van Nostrand Reinhold Company, New York.
- WALSKI, T. M. (1993) *Practical Aspects of Providing Reliability in Water Distribution Systems. Reliability Engineering and Systems Safety*, Elsevier, v. 42, n. 13.
- WALSKI, T. M. (1995) Optimization and Pipe-Sizing Decisions. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, v. 121, n. 4, p. 340-343.
- WALSKI, T. M. (2001) *The Wrong Paradigm - Why Water Distribution Optimization Doesn't Work*. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, v. 127, n. 4, p. 203-205.
- WALTERS G.A (1995) *Discussion on: Maximum Entropy Flows for Single-Source Network, por TANYIMBOH, T.T., TEMPLEMAN, A.B.*. Engineering Optimization, v. 25, p. 155-163.
- WATANADA, T. (1973) *Least Cost Design of Water Distribution Systems*. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, v. 99, n. 9, p. 1497-1514.
- WOOD, D. J. e CHARLES, C. O. A. (1972) *Hydraulic Network Analysis Using Linear Theory*. Journal of Hydraulics Division, ASCE, v. 98, n. 7, p. 1157-1170.
- XU, C. e GOULTER, I. C. (1998) *Probabilistic Model for Water Distribution Reliability*. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, v. 124, n. 4, p. 218-228

- XU, C. e GOULTER, I. C. (1999) *Reliability-Based Optimal Design of Water Distribution Networks*. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, v. 125, n. 6, p. 352–362.
- YSUSI, M. A. (2000) System Design: An Overview. In: MAYS, L. W. Water Distribution Systems Handbook, McGraw-Hill, p. 3.1-3.49.
- CHASE, D. V. (2000) *Operation of Water Distribution Systems*. In: MAYS, L. W. Water Distribution Systems Handbook, McGraw-Hill, p. 15.1-15.16.
- ZADEH, L.A. (1963) *Optimality and Non-scalar-valued Performance Criteria*. IEEE Transactions Automatic Control, v. AC-8, p. 1-12.
- ZANAKIS, S. H. ; SOLOMON, A. ; WISHART, N. ; DUBLISH, S. (1998) *Multi-attribute decisionmaking: a simulation comparison of selected methods*. European Journal of Operational Research, v. 107, p. 507-529.
- YU, P. J. e ZELENY, M. (1975) *The set of all Nondominated Solutions in Linear Cases and a Multicriteria Simplex Method*. Journal of Mathematical Analysis and Applications, v. 49, n. 2, p. 430-468.
- ZITZLER, E. (1998) *Evolutionary Algorithms for Multiobjective Optimization*. In K. Giannakoglou, D. Tsahalis, J. Periaux, K. Papailiou and T. Fogarty (Editors), Evolutionary Methods for Design, Optimization and Control, CIMNE, Barcelona, Spain, 1998
- ZITZLER, E. (1999) *Evolutionary Algorithms for Multiobjective Optimization: Methods and Applications*. PhD thesis, Swiss Federal Institute of Technology (ETH), Zurich, Switzerland.
- ZITZLER, E. e THIELE, L. (1998). *An evolutionary algorithm for multiobjective optimization: The strength pareto approach*. Technical Report 43, Computer Engineering and Networks Laboratory (TIK), Swiss Federal Institute of Technology (ETH) Zurich, Gloriastrasse 35, CH-8092 Zurich, Switzerland.
- ZITZLER, E. , DEB, K. e THIELE, L. (2000) *Comparison of Multiobjective Evolutionary Algorithms: Empirical Results*. Evolutionary Computation, Vol. 8 N° 2 pgs. 173-195.
- ZITZLER, E. , LAUMANN, M. e THIELE, L. (2001) *SPEA2: Improving the Strength Pareto Evolutionary Algorithm*, Technical Report 103, Computer Engineering and Networks Laboratory (TIK), Swiss Federal Institute of Technology (ETH) Zurich, Gloriastrasse 35, CH-8092 Zurich, Switzerland.
- ZUFFO, A. C. (1998) *Seleção e Aplicação de Métodos Multicriteriais ao Planejamento Ambiental de Recursos Hídricos*. Tese de Doutorado, Departamento de Hidráulica e Saneamento, Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo.

ANEXO A
RESULTADOS DAS METODOLOGIAS EMPREGADAS

ANEXO A.1

Resultados da Análise do Método de Geração de Soluções Não Dominadas e Seus Operadores

Tabela A.1 - Valores médios da Métrica C(A,B) para as diferentes configurações do método NSGAIII considerando dois objetivos

Config.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	MÉDIA
1	-	0.498	0.426	0.657	0.494	0.616	0.369	0.353	0.450	0.578	0.578	0.492	0.501
2	0.406	-	0.333	0.530	0.443	0.470	0.316	0.314	0.359	0.569	0.522	0.373	0.421
3	0.542	0.543	-	0.640	0.581	0.691	0.427	0.413	0.448	0.554	0.597	0.565	0.545
4	0.356	0.411	0.317	-	0.325	0.299	0.413	0.306	0.368	0.450	0.414	0.403	0.369
5	0.368	0.431	0.341	0.604	-	0.476	0.436	0.315	0.380	0.494	0.450	0.416	0.428
6	0.309	0.398	0.279	0.523	0.383	-	0.274	0.228	0.390	0.471	0.437	0.293	0.362
7	0.392	0.471	0.450	0.517	0.453	0.552	-	0.252	0.336	0.483	0.454	0.362	0.429
8	0.526	0.536	0.483	0.677	0.594	0.655	0.483	-	0.476	0.635	0.603	0.525	0.563
9	0.412	0.441	0.419	0.532	0.500	0.498	0.333	0.265	-	0.562	0.423	0.467	0.441
10	0.183	0.235	0.321	0.365	0.289	0.277	0.224	0.099	0.170	-	0.251	0.190	0.237
11	0.288	0.379	0.373	0.546	0.401	0.476	0.264	0.279	0.352	0.507	-	0.314	0.380
12	0.489	0.505	0.441	0.537	0.468	0.595	0.525	0.422	0.492	0.624	0.547	-	0.513
MÉDIA	0.388	0.441	0.380	0.557	0.448	0.510	0.370	0.295	0.384	0.539	0.480	0.400	

Tabela A.2 - Valores médios da Métrica C(A,B) para as diferentes configurações do método NSGAIII considerando três objetivos

Config.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	MÉDIA
1	-	0.538	0.547	0.628	0.581	0.485	0.497	0.516	0.488	0.537	0.474	0.487	0.525
2	0.578	-	0.587	0.641	0.634	0.597	0.486	0.502	0.570	0.496	0.592	0.507	0.563
3	0.598	0.585	-	0.617	0.621	0.582	0.511	0.487	0.606	0.524	0.533	0.518	0.562
4	0.365	0.424	0.376	-	0.432	0.433	0.366	0.372	0.402	0.420	0.383	0.373	0.395
5	0.421	0.379	0.343	0.437	-	0.439	0.379	0.327	0.361	0.443	0.446	0.404	0.398
6	0.489	0.458	0.482	0.532	0.550	-	0.501	0.435	0.429	0.463	0.419	0.449	0.473
7	0.556	0.593	0.546	0.604	0.580	0.528	-	0.534	0.568	0.550	0.591	0.548	0.563
8	0.586	0.597	0.562	0.639	0.628	0.623	0.551	-	0.610	0.606	0.568	0.587	0.596
9	0.520	0.521	0.511	0.650	0.575	0.527	0.474	0.486	-	0.583	0.535	0.504	0.535
10	0.387	0.420	0.373	0.470	0.474	0.434	0.414	0.407	0.441	-	0.471	0.415	0.428
11	0.464	0.422	0.415	0.501	0.565	0.533	0.477	0.410	0.483	0.542	-	0.441	0.477
12	0.545	0.496	0.473	0.559	0.580	0.555	0.496	0.459	0.521	0.558	0.518	-	0.524
MÉDIA	0.501	0.494	0.474	0.571	0.565	0.521	0.468	0.449	0.498	0.520	0.503	0.476	

Tabela A.3 - Valores médios da Métrica C(A,B) para as diferentes configurações do método NSGAIII considerando quatro objetivos

Config.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	MÉDIA
1	-	0.312	0.320	0.370	0.323	0.370	0.326	0.319	0.284	0.311	0.332	0.376	0.331
2	0.338	-	0.324	0.391	0.336	0.362	0.343	0.315	0.294	0.339	0.340	0.385	0.343
3	0.338	0.324	-	0.364	0.331	0.343	0.327	0.308	0.290	0.327	0.341	0.399	0.336
4	0.232	0.206	0.211	-	0.220	0.222	0.233	0.238	0.202	0.264	0.253	0.270	0.232
5	0.276	0.260	0.245	0.321	-	0.286	0.272	0.260	0.229	0.303	0.284	0.326	0.278
6	0.296	0.277	0.277	0.312	0.280	-	0.296	0.268	0.246	0.301	0.282	0.322	0.287
7	0.304	0.259	0.274	0.345	0.308	0.301	-	0.286	0.250	0.313	0.297	0.344	0.298
8	0.311	0.285	0.288	0.359	0.317	0.338	0.318	-	0.263	0.336	0.317	0.376	0.319
9	0.321	0.299	0.303	0.380	0.311	0.348	0.332	0.311	-	0.348	0.343	0.381	0.334
10	0.192	0.160	0.172	0.264	0.181	0.204	0.205	0.200	0.159	-	0.191	0.237	0.197
11	0.200	0.197	0.182	0.284	0.194	0.206	0.237	0.183	0.169	0.225	-	0.247	0.211
12	0.257	0.239	0.233	0.307	0.250	0.262	0.265	0.219	0.216	0.289	0.255	-	0.254
MÉDIA	0.279	0.256	0.257	0.336	0.277	0.295	0.287	0.264	0.236	0.305	0.294	0.333	

Tabela A.4 - Valores médios da Métrica C(A,B) para as diferentes configurações do método SPEA considerando dois objetivos

Config.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	MÉDIA
1	-	0.434	0.457	0.804	0.578	0.749	0.226	0.254	0.351	0.564	0.424	0.466	0.482
2	0.293	-	0.383	0.787	0.473	0.786	0.172	0.264	0.337	0.493	0.413	0.365	0.433
3	0.233	0.312	-	0.697	0.462	0.667	0.150	0.169	0.289	0.440	0.338	0.329	0.371
4	0.115	0.153	0.191	-	0.219	0.427	0.084	0.076	0.151	0.250	0.135	0.170	0.179
5	0.134	0.223	0.244	0.606	-	0.597	0.088	0.122	0.181	0.339	0.221	0.200	0.269
6	0.228	0.270	0.303	0.521	0.393	-	0.162	0.214	0.270	0.331	0.255	0.280	0.293
7	0.289	0.362	0.367	0.773	0.540	0.757	-	0.310	0.423	0.618	0.502	0.488	0.494
8	0.364	0.467	0.563	0.851	0.586	0.831	0.234	-	0.486	0.586	0.491	0.466	0.539
9	0.344	0.351	0.398	0.751	0.486	0.721	0.158	0.245	-	0.535	0.408	0.403	0.436
10	0.110	0.251	0.228	0.563	0.352	0.576	0.062	0.119	0.157	-	0.209	0.241	0.261
11	0.163	0.207	0.273	0.735	0.399	0.685	0.100	0.157	0.235	0.475	-	0.328	0.342
12	0.196	0.289	0.304	0.707	0.456	0.702	0.106	0.172	0.284	0.461	0.290	-	0.361
MÉDIA	0.224	0.302	0.337	0.709	0.449	0.682	0.140	0.191	0.288	0.463	0.335	0.340	

Tabela A.5 - Valores médios da Métrica C(A,B) para as diferentes configurações do método SPEA considerando três objetivos

Config.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	MÉDIA
1	-	0.310	0.307	0.432	0.401	0.340	0.325	0.277	0.288	0.373	0.329	0.327	0.337
2	0.320	-	0.360	0.451	0.393	0.364	0.293	0.311	0.330	0.405	0.335	0.382	0.359
3	0.328	0.325	-	0.437	0.375	0.388	0.284	0.299	0.280	0.378	0.345	0.343	0.344
4	0.202	0.201	0.221	-	0.255	0.276	0.193	0.203	0.188	0.264	0.186	0.231	0.220
5	0.242	0.269	0.271	0.376	-	0.302	0.240	0.266	0.235	0.323	0.292	0.303	0.283
6	0.268	0.294	0.281	0.389	0.344	-	0.246	0.252	0.250	0.360	0.298	0.317	0.300
7	0.298	0.310	0.318	0.428	0.364	0.342	-	0.301	0.276	0.359	0.354	0.350	0.336
8	0.362	0.365	0.359	0.444	0.387	0.395	0.320	-	0.359	0.455	0.372	0.389	0.382
9	0.322	0.350	0.340	0.469	0.404	0.374	0.321	0.319	-	0.416	0.363	0.373	0.368
10	0.217	0.213	0.257	0.340	0.282	0.246	0.215	0.207	0.204	-	0.258	0.260	0.245
11	0.278	0.287	0.292	0.418	0.325	0.318	0.246	0.266	0.260	0.351	-	0.310	0.305
12	0.268	0.256	0.284	0.396	0.300	0.315	0.239	0.249	0.251	0.359	0.297	-	0.292
MÉDIA	0.282	0.289	0.299	0.416	0.348	0.333	0.266	0.268	0.265	0.368	0.312	0.326	

Tabela A.6 - Valores médios da Métrica C(A,B) para as diferentes configurações do método SPEA considerando quatro objetivos

Config.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	MÉDIA
1	-	0.196	0.187	0.240	0.244	0.235	0.224	0.197	0.184	0.243	0.242	0.228	0.220
2	0.195	-	0.191	0.253	0.269	0.258	0.252	0.215	0.195	0.264	0.245	0.239	0.234
3	0.204	0.189	-	0.244	0.267	0.249	0.226	0.217	0.194	0.262	0.234	0.242	0.230
4	0.175	0.169	0.166	-	0.224	0.211	0.192	0.175	0.166	0.222	0.210	0.201	0.192
5	0.173	0.154	0.141	0.194	-	0.207	0.192	0.170	0.168	0.220	0.209	0.194	0.184
6	0.187	0.169	0.170	0.211	0.237	-	0.215	0.182	0.165	0.211	0.206	0.187	0.194
7	0.181	0.158	0.183	0.228	0.236	0.216	-	0.183	0.185	0.237	0.210	0.207	0.202
8	0.203	0.188	0.176	0.232	0.250	0.237	0.220	-	0.199	0.237	0.240	0.230	0.219
9	0.211	0.191	0.193	0.254	0.250	0.239	0.218	0.199	-	0.258	0.256	0.238	0.228
10	0.155	0.135	0.136	0.187	0.193	0.196	0.181	0.163	0.147	-	0.189	0.175	0.169
11	0.164	0.148	0.154	0.191	0.208	0.195	0.185	0.178	0.160	0.206	-	0.190	0.180
12	0.171	0.155	0.146	0.201	0.223	0.208	0.200	0.152	0.160	0.211	0.204	-	0.185
MÉDIA	0.183	0.168	0.167	0.221	0.236	0.223	0.209	0.184	0.175	0.234	0.222	0.212	

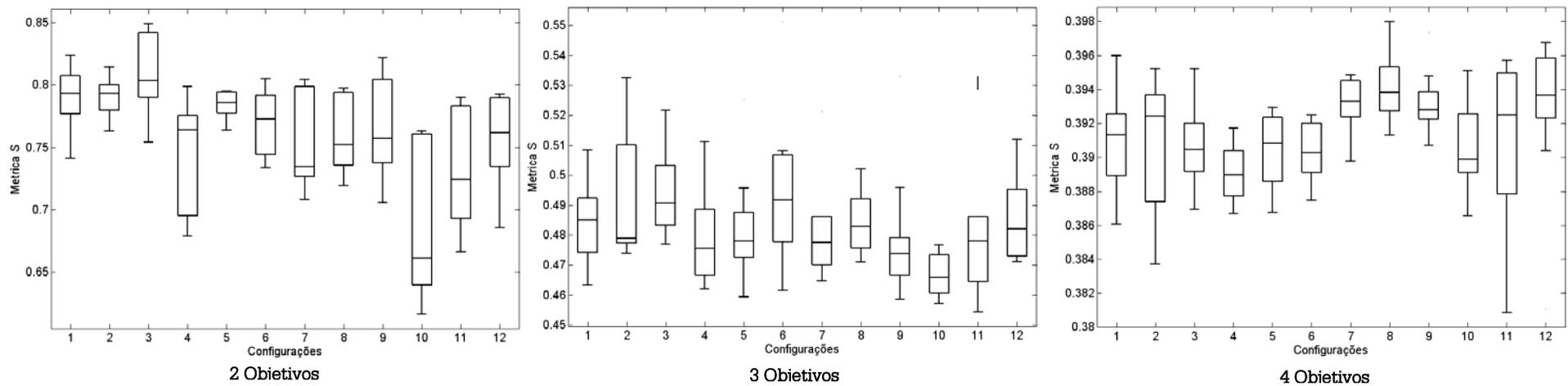


Figura A.1 - Box-plots dos valores da Métrica S de diferentes configurações utilizando o método NSGAII considerando 2, 3 e 4 objetivos.

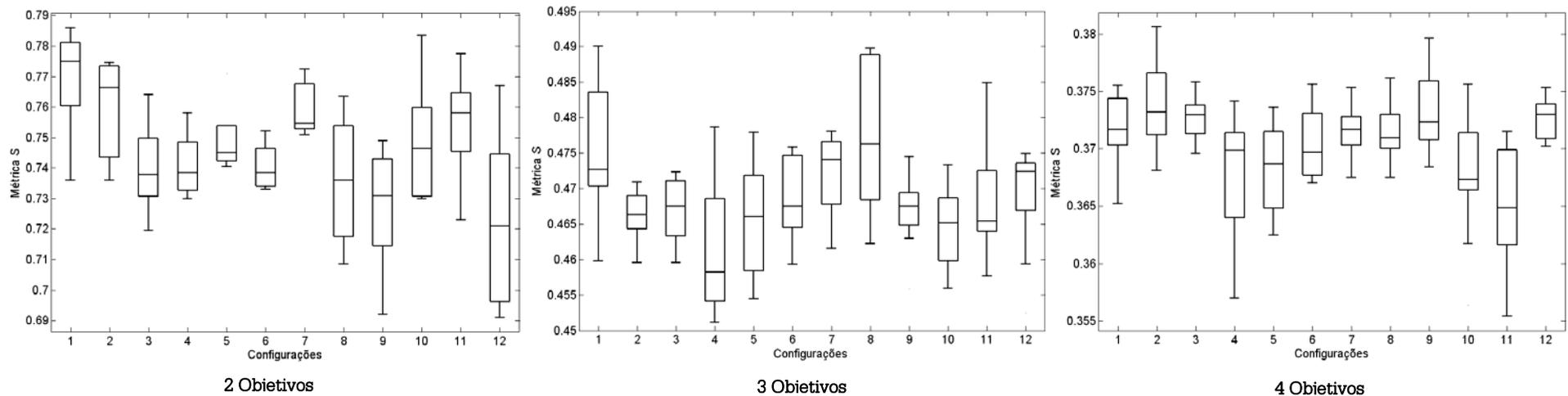


Figura A.2 - Box-plots dos valores da Métrica S de diferentes configurações utilizando o método SPEA considerando 2, 3 e 4 objetivos.

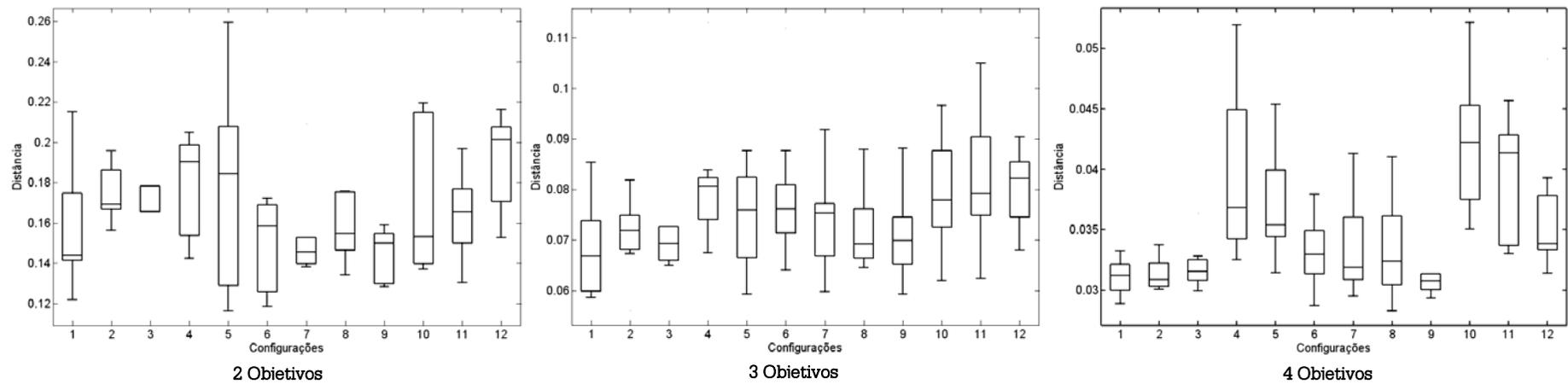


Figura A.3 - Box-plots dos valores do *espaçamento* das várias configurações, para o método NSGAI considerando 2, 3 e 4 objetivos.

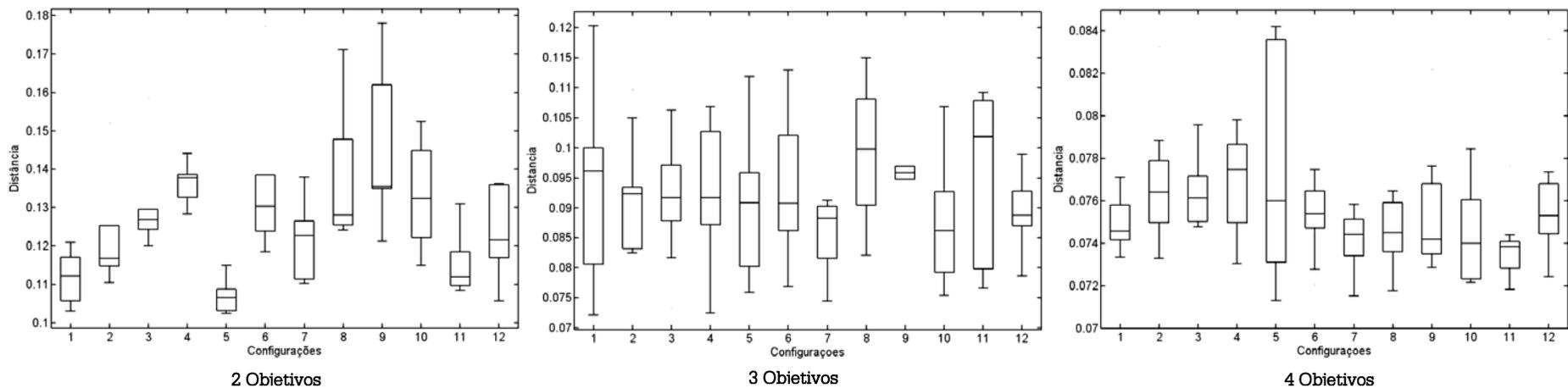


Figura A.4- Box-plots dos valores do *espaçamento* das várias configurações, para o método SPEA considerando 2, 3 e 4 objetivos.

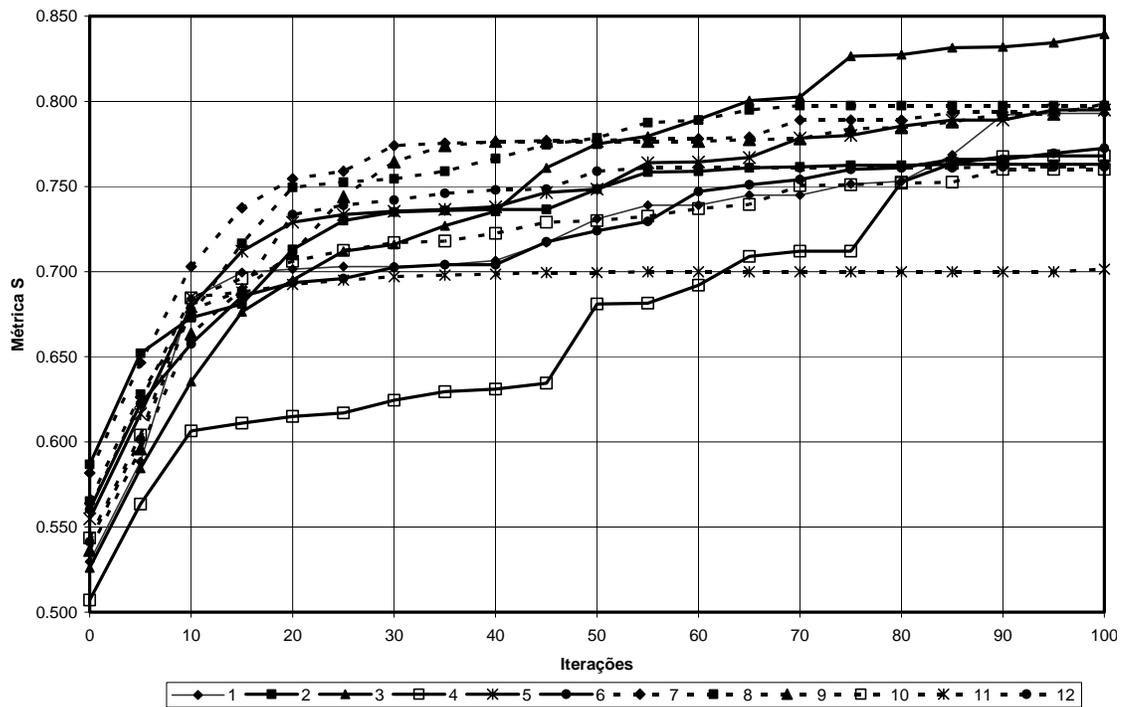


Figura A.5 - Evolução dos valores da Métrica S para diferentes configurações do método NSGAIII para considerando *dois* objetivos

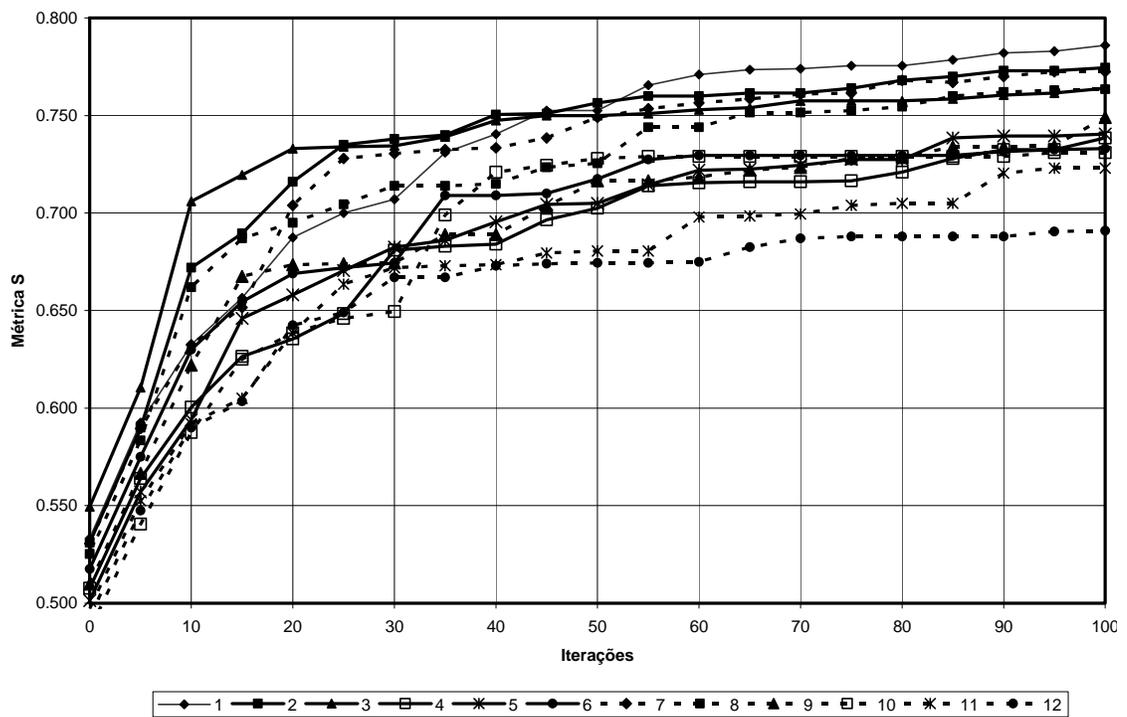


Figura A.6 - Evolução dos valores da Métrica S para diferentes configurações do método SPEA para considerando *dois* objetivos

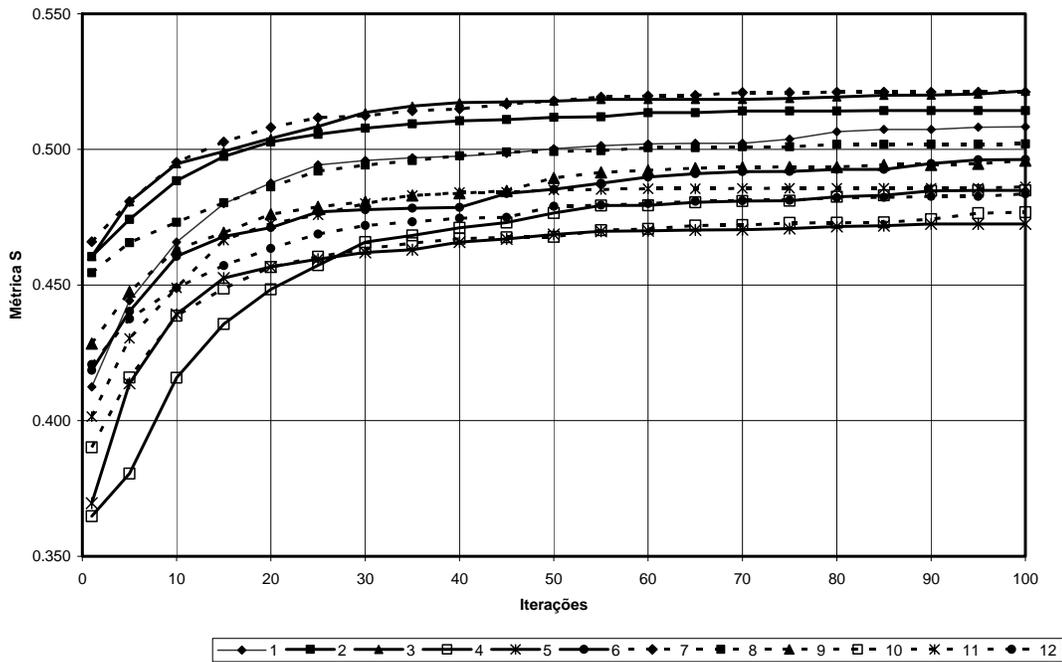


Figura A.7 - Evolução dos valores da Métrica S para diferentes configurações do método NSGAIII para considerando *três* objetivos

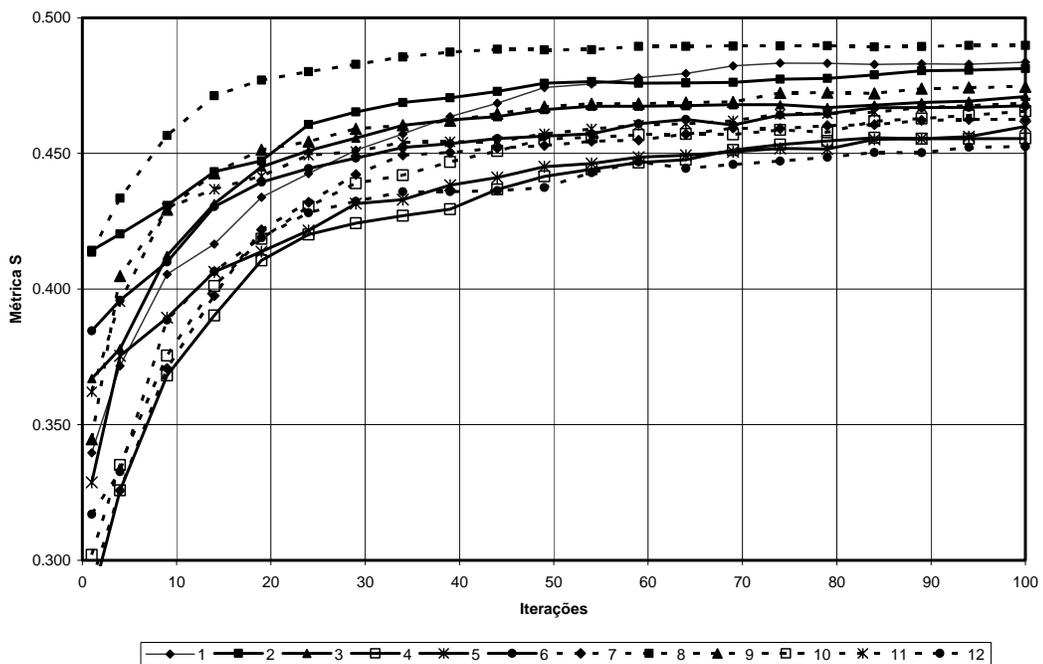


Figura A.8 - Evolução dos valores da Métrica S para diferentes configurações do método SPEA para considerando *três* objetivos

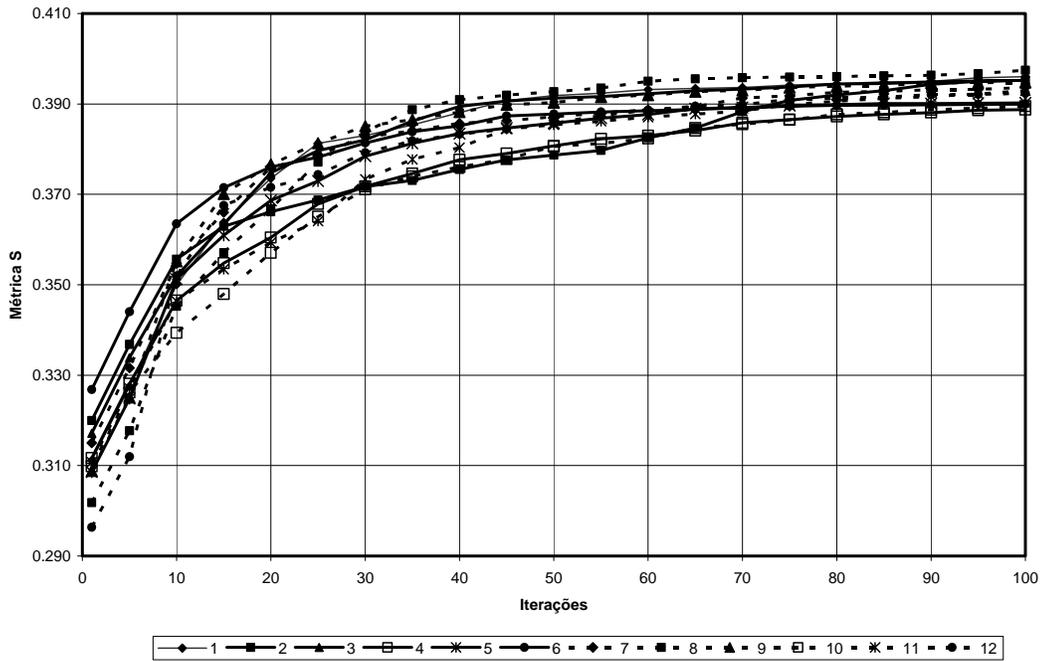


Figura A.9 - Evolução dos valores da Métrica S para diferentes configurações do método NSGAIII para considerando *quatro* objetivos

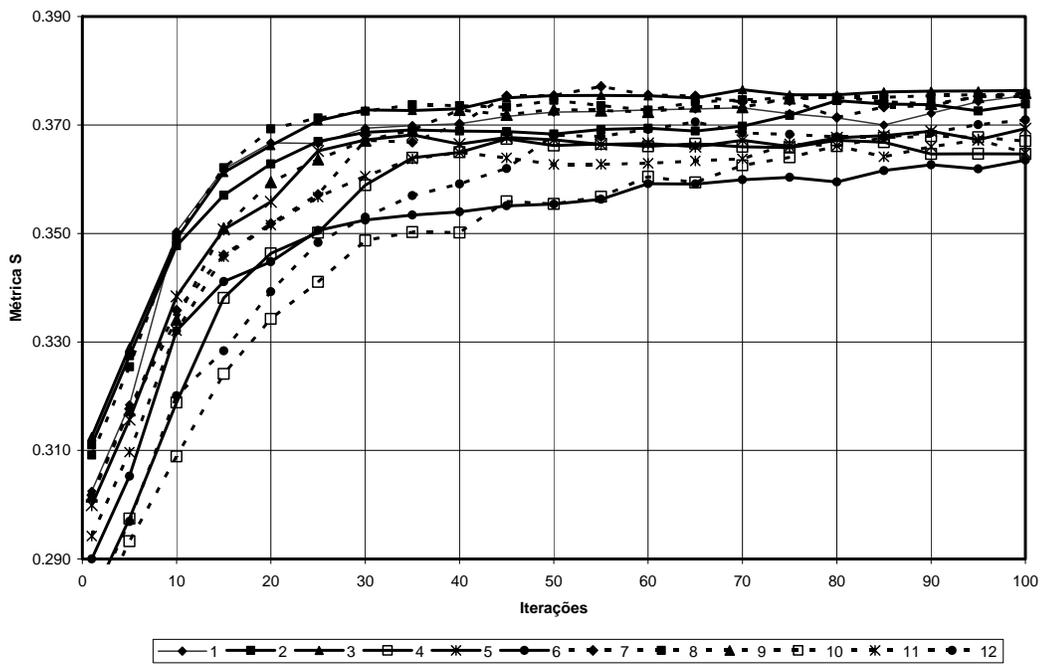


Figura A.10 - Evolução dos valores da Métrica S para diferentes configurações do método SPEA para considerando *quatro* objetivos

ANEXO A.2

Resultados da Otimização Multiobjetivo da Rede Dois Anéis

Tabela A.7 - Resultado da aplicação do método ELECTRE III aos dados gerados para a rede Dois Anéis utilizando os critérios da Simulação 1

Class	Altern	FO1 (UMT)	FO2 (l/s)	FO3	FO4	FO6	FO7	FO8	Trecho (Diâmetro mm)							
									1	2	3	4	5	6	7	8
1	59	864.000	46,1	2,45	0,839	1,000	0,989	0,888	550	400	500	400	350	250	400	250
2	43	794.000	42,9	2,37	0,807	0,989	0,976	0,872	550	350	500	400	300	250	350	250
3	37	750.000	41,6	2,10	0,806	0,994	0,981	0,883	550	350	450	350	300	300	300	300
4	77	943.000	47,0	2,51	0,831	1,000	0,991	0,856	550	450	450	450	300	200	400	400
5	29	682.000	41,9	2,39	0,749	0,967	0,943	0,847	500	400	400	450	350	250	300	350
6	82	968.000	46,6	2,28	0,851	1,000	1,000	0,867	550	500	400	500	350	450	150	250
7	40	782.000	42,6	2,51	0,784	0,986	0,972	0,861	550	350	400	350	350	250	450	300
8	44	797.000	42,6	2,02	0,853	1,000	1,000	0,890	550	400	500	350	200	400	250	250
9	89	1.014.000	43,3	2,35	0,828	0,995	0,983	0,880	600	350	500	350	300	250	350	250
10	50	822.000	40,4	2,21	0,795	1,000	0,987	0,744	550	400	350	400	350	500	50	300

Tabela A.8 - Resultado da aplicação do método PROMETHEE aos dados gerados para a rede Dois Anéis utilizando os critérios da Simulação 1

Class	Altern	FO1 (UMT)	FO2 (l/s)	FO3	FO4	FO6	FO7	FO8	Trecho (Diâmetro mm)							
									1	2	3	4	5	6	7	8
1	13	593.000	38,0	2,52	0,700	0,948	0,921	0,796	500	400	350	350	300	200	400	300
2	59	864.000	46,1	2,45	0,839	1,000	0,989	0,888	550	400	500	400	350	250	400	250
3	40	782.000	42,6	2,51	0,784	0,986	0,972	0,861	550	350	400	350	350	250	450	300
4	43	794.000	42,9	2,37	0,807	0,989	0,976	0,872	550	350	500	400	300	250	350	250
5	31	702.000	38,9	2,47	0,733	0,965	0,943	0,827	550	350	350	350	300	250	400	300
6	30	692.000	39,1	2,35	0,755	0,966	0,943	0,840	550	350	400	350	300	250	300	300
7	34	714.000	37,4	2,19	0,769	0,971	0,949	0,735	550	400	350	400	300	400	50	250
8	11	576.000	35,2	2,17	0,707	0,926	0,900	0,638	500	450	350	400	250	350	50	250
9	27	675.000	37,2	1,96	0,813	1,000	1,000	0,732	550	400	400	350	200	350	300	50
10	29	682.000	41,9	2,39	0,749	0,967	0,943	0,847	500	400	400	450	350	250	300	350

Tabela A.9 - Resultado da aplicação do método ELECTRE III aos dados gerados para a rede Dois Anéis utilizando os critérios da Simulação 2

Class	Altern	FO1 (UMT)	FO2 (l/s)	FO3	FO4	FO6	FO7	FO8	Trecho (Diâmetro mm)							
									1	2	3	4	5	6	7	8
1	48	812.000	44,0	2,17	0,830	1,000	0,996	0,895	550	350	500	400	300	300	350	250
2	44	797.000	42,6	2,02	0,853	1,000	1,000	0,890	550	400	500	350	200	400	250	250
3	27	675.000	37,2	1,96	0,813	1,000	1,000	0,732	550	400	400	350	200	350	300	50
4	59	864.000	46,1	2,45	0,839	1,000	0,989	0,888	550	400	500	400	350	250	400	250
5	50	822.000	40,4	2,21	0,795	1,000	0,987	0,744	550	400	350	400	350	500	50	300
6	47	810.000	46,7	2,08	0,825	1,000	1,000	0,894	500	450	500	400	350	400	300	300
7	77	943.000	47,0	2,51	0,831	1,000	0,991	0,856	550	450	450	450	300	200	400	400
8	82	968.000	46,6	2,28	0,851	1,000	1,000	0,867	550	500	400	500	350	450	150	250
9	79	950.000	49,1	2,39	0,855	1,000	1,000	0,898	550	400	500	350	400	300	450	350
10	37	750.000	41,6	2,10	0,806	0,994	0,981	0,883	550	350	450	350	300	300	300	300

Tabela A.10 - Resultado da aplicação do método PROMETHEE aos dados gerados para a rede Dois Anéis utilizando os critérios da Simulação 2

Class	Altern	FO1 (UMT)	FO2 (l/s)	FO3	FO4	FO6	FO7	FO8	Trecho (Diâmetro mm)							
									1	2	3	4	5	6	7	8
1	27	675.000	37,2	1,96	0,813	1,000	1,000	0,732	550	400	400	350	200	350	300	50
2	44	797.000	42,6	2,02	0,853	1,000	1,000	0,890	550	400	500	350	200	400	250	250
3	42	794.000	35,9	1,69	0,814	1,000	1,000	0,709	550	300	500	450	50	400	50	300
4	48	812.000	44,0	2,17	0,830	1,000	0,996	0,895	550	350	500	400	300	300	350	250
5	50	822.000	40,4	2,21	0,795	1,000	0,987	0,744	550	400	350	400	350	500	50	300
6	19	622.000	35,8	1,59	0,786	0,997	0,983	0,867	500	250	500	200	350	450	50	250
7	59	864.000	46,1	2,45	0,839	1,000	0,989	0,888	550	400	500	400	350	250	400	250
8	36	728.000	39,1	1,72	0,815	1,000	1,000	0,720	500	400	450	400	150	500	50	350
9	24	664.000	35,9	1,74	0,780	0,996	0,980	0,822	550	250	450	150	350	350	300	150
10	28	677.000	36,6	1,40	0,790	1,000	0,997	0,756	500	200	500	250	350	500	50	300

Tabela A.11 - Resultado da aplicação do método ELECTRE III aos dados gerados para a rede Dois Anéis utilizando os critérios da Simulação 3

Class	Altern	FO1 (UMT)	FO2 (l/s)	FO3	FO4	FO6	FO7	FO8	Trecho (Diâmetro mm)							
									1	2	3	4	5	6	7	8
1	22	657.000	37,4	1,92	0,746	0,978	0,962	0,903	500	450	300	400	50	400	400	250
2	35	722.000	39,7	2,02	0,785	0,987	0,973	0,870	550	300	450	350	300	300	300	250
3	37	750.000	41,6	2,10	0,806	0,994	0,981	0,883	550	350	450	350	300	300	300	300
4	33	710.000	43,4	2,00	0,789	0,999	0,985	0,875	500	300	500	400	350	350	350	300
5	44	797.000	42,6	2,02	0,853	1,000	1,000	0,890	550	400	500	350	200	400	250	250
6	21	652.000	40,6	1,97	0,737	0,977	0,958	0,853	500	400	350	350	250	400	350	400
7	63	888.000	35,3	1,84	0,789	0,992	0,980	0,894	600	350	400	300	50	350	200	300
8	48	812.000	44,0	2,17	0,830	1,000	0,996	0,895	550	350	500	400	300	300	350	250
9	43	794.000	42,9	2,37	0,807	0,989	0,976	0,872	550	350	500	400	300	250	350	250
10	53	833.000	39,6	1,92	0,828	0,999	0,987	0,863	550	500	400	400	150	450	50	250

Tabela A.12 - Resultado da aplicação do método PROMETHEE aos dados gerados para a rede Dois Anéis utilizando os critérios da Simulação 3

Class	Altern	FO1 (UMT)	FO2 (l/s)	FO3	FO4	FO6	FO7	FO8	Trecho (Diâmetro mm)							
									1	2	3	4	5	6	7	8
1	22	657.000	37,4	1,92	0,746	0,978	0,962	0,903	500	450	300	400	50	400	400	250
2	19	622.000	35,8	1,59	0,786	0,997	0,983	0,867	500	250	500	200	350	450	50	250
3	63	888.000	35,3	1,84	0,789	0,992	0,980	0,894	600	350	400	300	50	350	200	300
4	61	866.000	32,3	1,52	0,761	0,968	0,946	0,865	600	200	450	150	300	350	50	250
5	8	516.000	30,2	1,47	0,653	0,929	0,899	0,812	450	200	450	150	400	400	50	250
6	35	722.000	39,7	2,02	0,785	0,987	0,973	0,870	550	300	450	350	300	300	300	250
7	37	750.000	41,6	2,10	0,806	0,994	0,981	0,883	550	350	450	350	300	300	300	300
8	12	590.000	36,5	2,05	0,735	0,969	0,944	0,833	500	450	400	250	250	400	200	200
9	44	797.000	42,6	2,02	0,853	1,000	1,000	0,890	550	400	500	350	200	400	250	250
10	33	710.000	43,4	2,00	0,789	0,999	0,985	0,875	500	300	500	400	350	350	350	300

Tabela A.13 - Resultado da aplicação do método ELECTRE III aos dados gerados para a rede Dois Anéis utilizando os critérios da Simulação 4

Class	Altern	FO1 (UMT)	FO2 (l/s)	FO5	FO6	FO7	FO8	Trecho (Diâmetro mm)							
								1	2	3	4	5	6	7	8
1	65	615,000	39.0	0.569	0.991	0.975	0.863	500	350	500	300	300	350	200	250
2	76	636,000	39.0	0.573	1.000	0.989	0.866	500	350	500	300	300	400	200	200
3	64	614,000	39.0	0.567	0.999	0.986	0.872	500	350	450	300	300	400	250	250
4	43	578,000	37.0	0.550	0.991	0.969	0.851	500	350	450	250	300	400	200	200
5	109	705,000	39.0	0.583	0.999	0.985	0.869	550	350	450	300	300	350	200	250
6	120	736,000	40.0	0.594	1.000	0.996	0.871	550	350	500	300	300	350	200	200
7	106	695,000	38.0	0.575	0.994	0.981	0.863	550	300	450	300	300	350	200	250
8	37	557,000	37.0	0.546	0.980	0.956	0.847	500	350	450	250	300	350	200	250
9	83	645,000	40.0	0.576	1.000	0.994	0.866	500	350	500	300	300	400	200	250
10	42	575,000	38.0	0.553	0.983	0.962	0.857	500	350	450	300	300	350	200	250

Tabela A.14 - Resultado da aplicação do método PROMETHEE aos dados gerados para a rede Dois Anéis utilizando os critérios da Simulação 4

Class	Altern	FO1 (UMT)	FO2 (l/s)	FO5	FO6	FO7	FO8	Trecho (Diâmetro mm)							
								1	2	3	4	5	6	7	8
1	89	654,000	41.0	0.582	1.000	0.996	0.875	500	350	500	300	300	400	250	250
2	76	636,000	39.0	0.573	1.000	0.989	0.866	500	350	500	300	300	400	200	200
3	83	645,000	40.0	0.576	1.000	0.994	0.866	500	350	500	300	300	400	200	250
4	120	736,000	40.0	0.594	1.000	0.996	0.871	550	350	500	300	300	350	200	200
5	95	674,000	42.0	0.587	1.000	0.996	0.880	500	350	500	350	350	400	250	250
6	92	664,000	42.0	0.584	1.000	0.997	0.881	500	350	500	350	300	400	250	250
7	112	715,000	40.0	0.588	0.998	0.984	0.868	550	350	450	300	350	350	200	250
8	65	615,000	39.0	0.569	0.991	0.975	0.863	500	350	500	300	300	350	200	250
9	124	745,000	41.0	0.599	1.000	0.995	0.872	550	350	500	300	300	350	200	250
10	109	705,000	39.0	0.583	0.999	0.985	0.869	550	350	450	300	300	350	200	250

Tabela A.15 - Resultado da aplicação do método ELECTRE III aos dados gerados para a rede Dois Anéis utilizando os critérios da Simulação 5

Class	Altern	FO1 (UMT)	FO2 (l/s)	FO5	FO6	FO7	FO8	Trecho (Diâmetro mm)							
								1	2	3	4	5	6	7	8
1	66	617,000	38.0	0.557	1.000	0.991	0.865	500	300	500	300	250	400	250	200
2	67	618,000	38.0	0.560	1.000	0.988	0.861	500	350	500	300	250	400	200	200
3	60	608,000	37.0	0.553	0.996	0.983	0.855	500	300	500	300	250	400	200	200
4	76	636,000	39.0	0.573	1.000	0.989	0.866	500	350	500	300	300	400	200	200
5	64	614,000	39.0	0.567	0.999	0.986	0.872	500	350	450	300	300	400	250	250
6	49	590,000	36.0	0.544	0.993	0.979	0.849	500	300	500	250	250	400	200	200
7	83	645,000	40.0	0.576	1.000	0.994	0.866	500	350	500	300	300	400	200	250
8	103	690,000	38.0	0.570	1.000	0.989	0.857	550	350	450	250	250	400	200	200
9	99	680,000	37.0	0.560	0.997	0.986	0.853	550	300	450	250	250	400	200	200
10	89	654,000	41.0	0.582	1.000	0.996	0.875	500	350	500	300	300	400	250	250

Tabela A.16 - Resultado da aplicação do método PROMETHEE aos dados gerados para a rede Dois Anéis utilizando os critérios da Simulação 5

Class	Altern	FO1 (UMT)	FO2 (l/s)	FO5	FO6	FO7	FO8	Trecho (Diâmetro mm)							
								1	2	3	4	5	6	7	8
1	83	645,000	40.0	0.576	1.000	0.994	0.866	500	350	500	300	300	400	200	250
2	89	654,000	41.0	0.582	1.000	0.996	0.875	500	350	500	300	300	400	250	250
3	76	636,000	39.0	0.573	1.000	0.989	0.866	500	350	500	300	300	400	200	200
4	66	617,000	38.0	0.557	1.000	0.991	0.865	500	300	500	300	250	400	250	200
5	96	676,000	40.0	0.577	1.000	0.993	0.869	500	350	500	300	300	450	200	200
6	67	618,000	38.0	0.560	1.000	0.988	0.861	500	350	500	300	250	400	200	200
7	92	664,000	42.0	0.584	1.000	0.997	0.881	500	350	500	350	300	400	250	250
8	95	674,000	42.0	0.587	1.000	0.996	0.880	500	350	500	350	350	400	250	250
9	64	614,000	39.0	0.567	0.999	0.986	0.872	500	350	450	300	300	400	250	250
10	100	682,000	42.0	0.585	1.000	0.995	0.878	500	350	500	350	300	400	250	300

Tabela A.17 - Resultado da aplicação do método ELECTRE III aos dados gerados para a rede Dois Anéis utilizando os critérios da Simulação 6

Class	Altern	FO1 (UMT)	FO2 (l/s)	FO5	FO6	FO7	FO8	Trecho (Diâmetro mm)							
								1	2	3	4	5	6	7	8
1	64	614,000	39.0	0.567	0.999	0.986	0.872	500	350	450	300	300	400	250	250
2	34	548,000	37.0	0.541	0.983	0.961	0.853	500	350	450	250	250	350	250	250
3	66	617,000	38.0	0.557	1.000	0.991	0.865	500	300	500	300	250	400	250	200
4	36	556,000	36.0	0.540	0.976	0.952	0.848	500	300	450	300	300	350	200	200
5	42	575,000	38.0	0.553	0.983	0.962	0.857	500	350	450	300	300	350	200	250
6	33	547,000	36.0	0.535	0.979	0.956	0.846	500	300	450	300	250	350	200	250
7	71	624,000	40.0	0.570	0.999	0.985	0.872	500	350	450	300	350	400	250	250
8	30	529,000	35.0	0.527	0.975	0.951	0.841	500	300	450	250	250	350	200	250
9	67	618,000	38.0	0.560	1.000	0.988	0.861	500	350	500	300	250	400	200	200
10	58	605,000	39.0	0.560	0.996	0.981	0.863	500	350	450	300	300	400	200	250

Tabela A.18 - Resultado da aplicação do método PROMETHEE aos dados gerados para a rede Dois Anéis utilizando os critérios da Simulação 6

Class	Altern	FO1 (UMT)	FO2 (l/s)	FO5	FO6	FO7	FO8	Trecho (Diâmetro mm)							
								1	2	3	4	5	6	7	8
1	64	614,000	39.0	0.567	0.999	0.986	0.872	500	350	450	300	300	400	250	250
2	71	624,000	40.0	0.570	0.999	0.985	0.872	500	350	450	300	350	400	250	250
3	66	617,000	38.0	0.557	1.000	0.991	0.865	500	300	500	300	250	400	250	200
4	89	654,000	41.0	0.582	1.000	0.996	0.875	500	350	500	300	300	400	250	250
5	72	625,000	40.0	0.570	0.992	0.977	0.867	500	350	500	350	300	350	200	250
6	92	664,000	42.0	0.584	1.000	0.997	0.881	500	350	500	350	300	400	250	250
7	76	636,000	39.0	0.573	1.000	0.989	0.866	500	350	500	300	300	400	200	200
8	58	605,000	39.0	0.560	0.996	0.981	0.863	500	350	450	300	300	400	200	250
9	95	674,000	42.0	0.587	1.000	0.996	0.880	500	350	500	350	350	400	250	250
10	65	615,000	39.0	0.569	0.991	0.975	0.863	500	350	500	300	300	350	200	250

ANEXO A.3

Resultados da Otimização Multiobjetivo da Rede do Bessa

Tabela A.19 - Resultado da aplicação do método ELECTRE III aos dados gerados para a rede do Bessa utilizando os critérios da Simulação 1

Class	Altern	FO1 (UMT)	FO2 (l/s)	FO3	FO4	FO6	FO7	FO8
1	271	247,408,000	68.4	12.283	0.411	0.978	0.950	0.938
2	285	248,889,000	66.0	12.168	0.401	0.968	0.941	0.944
3	245	244,542,000	65.7	11.968	0.404	0.978	0.950	0.938
4	288	249,183,000	67.4	12.100	0.413	0.978	0.948	0.937
5	284	248,617,000	66.7	12.060	0.410	0.977	0.950	0.938
6	298	250,643,000	65.8	11.993	0.422	0.974	0.950	0.944
7	249	244,965,000	64.7	11.866	0.413	0.970	0.945	0.940
8	280	248,400,000	68.4	11.972	0.429	0.989	0.965	0.941
9	303	251,003,000	68.3	11.990	0.440	0.989	0.964	0.946
10	293	249,788,000	66.6	11.884	0.432	0.978	0.951	0.942

Tabela A.20 - Resultado da aplicação do método PROMETHEE aos dados gerados para a rede do Bessa utilizando os critérios da Simulação 1

Class	Altern	FO1 (UMT)	FO2 (l/s)	FO3	FO4	FO6	FO7	FO8
1	222	243,004,000	64.8	12.214	0.381	0.962	0.935	0.935
2	228	243,261,000	62.5	12.229	0.355	0.953	0.922	0.933
3	237	243,891,000	62.9	12.528	0.327	0.951	0.919	0.933
4	208	241,390,000	62.3	12.425	0.323	0.952	0.919	0.935
5	252	245,053,000	62.5	12.495	0.330	0.943	0.913	0.935
6	204	240,322,000	61.6	12.094	0.349	0.955	0.921	0.930
7	277	248,312,000	66.9	12.617	0.364	0.961	0.936	0.930
8	232	243,523,000	63.8	12.256	0.356	0.958	0.929	0.938
9	181	236,675,000	60.9	12.396	0.298	0.956	0.925	0.935
10	215	242,156,000	65.1	12.249	0.362	0.949	0.922	0.927

Tabela A.21 - Resultado da aplicação do método ELECTRE III aos dados gerados para a rede do Bessa utilizando os critérios da Simulação 2

Class	Altern	FO1 (UMT)	FO2 (l/s)	FO3	FO4	FO6	FO7	FO8
1	275	248,078,000	72.4	11.687	0.470	1.000	0.991	0.940
2	376	263,597,000	72.1	12.296	0.468	0.998	0.987	0.957
3	307	251,482,000	70.5	11.649	0.488	0.994	0.984	0.942
4	325	254,862,000	70.9	11.967	0.474	0.994	0.979	0.944
5	359	260,904,000	73.7	12.341	0.467	0.995	0.980	0.948
6	356	260,589,000	69.6	12.013	0.468	0.992	0.976	0.956
7	316	252,626,000	66.6	11.872	0.435	0.992	0.972	0.948
8	187	238,302,000	67.2	11.057	0.459	0.995	0.979	0.944
9	294	249,898,000	68.0	11.748	0.443	0.995	0.969	0.941
10	254	245,219,000	66.3	11.673	0.432	0.993	0.967	0.949

Tabela A.22 - Resultado da aplicação do método PROMETHEE aos dados gerados para a rede do Bessa utilizando os critérios da Simulação 2

Class	Altern	FO1 (UMT)	FO2 (l/s)	FO3	FO4	FO6	FO7	FO8
1	275	248,078,000	72.4	11.687	0.470	1.000	0.991	0.940
2	307	251,482,000	70.5	11.649	0.488	0.994	0.984	0.942
3	187	238,302,000	67.2	11.057	0.459	0.995	0.979	0.944
4	376	263,597,000	72.1	12.296	0.468	0.998	0.987	0.957
5	254	245,219,000	66.3	11.673	0.432	0.993	0.967	0.949
6	325	254,862,000	70.9	11.967	0.474	0.994	0.979	0.944
7	163	234,969,000	64.8	10.664	0.472	0.994	0.978	0.937
8	316	252,626,000	66.6	11.872	0.435	0.992	0.972	0.948
9	220	242,643,000	65.2	10.515	0.512	0.998	0.986	0.944
10	294	249,898,000	68.0	11.748	0.443	0.995	0.969	0.941

Tabela A.23 - Resultado da aplicação do método ELECTRE III aos dados gerados para a rede do Bessa utilizando os critérios da Simulação 3

Class	Altern	FO1 (UMT)	FO2 (l/s)	FO3	FO4	FO6	FO7	FO8
1	326	256,026,000	65.0	11.874	0.414	0.984	0.956	0.952
2	127	232,453,000	59.6	11.787	0.337	0.955	0.922	0.931
3	146	233,739,000	61.4	11.252	0.396	0.983	0.954	0.934
4	163	234,969,000	64.8	10.664	0.472	0.994	0.978	0.937
5	142	233,541,000	65.5	10.078	0.499	0.993	0.981	0.943
6	165	235,106,000	60.7	11.264	0.382	0.969	0.936	0.932
7	147	233,846,000	57.1	10.254	0.371	0.962	0.930	0.931
8	148	234,040,000	64.6	9.762	0.506	0.987	0.967	0.938
9	176	236,300,000	69.8	9.875	0.537	0.998	0.994	0.943
10	167	235,110,000	62.2	9.629	0.495	0.987	0.969	0.946

Tabela A.24 - Resultado da aplicação do método PROMETHEE aos dados gerados para a rede do Bessa utilizando os critérios da Simulação 3

Class	Altern	FO1 (UMT)	FO2 (l/s)	FO3	FO4	FO6	FO7	FO8
1	356	260,589,000	69.6	12.013	0.468	0.992	0.976	0.956
2	376	263,597,000	72.1	12.296	0.468	0.998	0.987	0.957
3	385	265,207,000	72.8	11.867	0.515	0.993	0.984	0.957
4	326	256,026,000	65.0	11.874	0.414	0.984	0.956	0.952
5	391	266,409,000	76.2	12.245	0.497	0.997	0.981	0.956
6	449	267,305,000	72.4	11.660	0.532	0.996	0.980	0.951
7	442	267,305,000	72.4	11.660	0.532	0.996	0.980	0.951
8	423	267,305,000	72.4	11.660	0.532	0.996	0.980	0.951
9	254	245,219,000	66.3	11.673	0.432	0.993	0.967	0.949
10	270	247,392,000	61.6	11.320	0.406	0.974	0.950	0.947

Tabela A.25 - Resultado da aplicação do método ELECTRE III aos dados gerados para a rede do Bessa utilizando os critérios da Simulação 4

Class	Altern	FO1 (UMT)	FO2 (l/s)	FO5	FO6	FO7	FO8
1	192	237,348,000	60.6	0.786	0.983	0.961	0.957
2	210	239,297,000	62.1	0.790	0.988	0.965	0.960
3	198	237,744,000	61.5	0.786	0.985	0.963	0.957
4	199	237,903,000	60.7	0.786	0.985	0.963	0.957
5	206	238,789,000	60.7	0.788	0.990	0.965	0.959
6	193	237,408,000	59.9	0.785	0.982	0.959	0.957
7	203	238,288,000	60.3	0.787	0.984	0.957	0.959
8	202	237,970,000	60.2	0.786	0.981	0.956	0.958
9	189	237,005,000	59.9	0.784	0.986	0.960	0.956
10	185	236,797,000	59.8	0.783	0.982	0.960	0.957

Tabela A.26 - Resultado da aplicação do método PROMETHEE aos dados gerados para a rede do Bessa utilizando os critérios da Simulação 4

Class	Altern	FO1 (UMT)	FO2 (l/s)	FO5	FO6	FO7	FO8
1	192	237,348,000	60.6	0.786	0.983	0.961	0.957
2	180	236,251,000	59.5	0.782	0.981	0.957	0.955
3	177	235,884,000	59.4	0.780	0.979	0.953	0.955
4	185	236,797,000	59.8	0.783	0.982	0.960	0.957
5	184	236,682,000	59.9	0.783	0.984	0.957	0.957
6	176	235,446,000	59.0	0.779	0.976	0.949	0.954
7	193	237,408,000	59.9	0.785	0.982	0.959	0.957
8	169	234,948,000	58.7	0.777	0.973	0.945	0.954
9	173	235,355,000	59.0	0.778	0.975	0.948	0.954
10	189	237,005,000	59.9	0.784	0.986	0.960	0.956

Tabela A.27 - Resultado da aplicação do método ELECTRE III aos dados gerados para a rede do Bessa utilizando os critérios da Simulação 5

Class	Altern	FO1 (UMT)	FO2 (l/s)	FO5	FO6	FO7	FO8
1	206	238,789,000	60.7	0.788	0.990	0.965	0.959
2	189	237,005,000	59.9	0.784	0.986	0.960	0.956
3	199	237,903,000	60.7	0.786	0.985	0.963	0.957
4	251	245,108,000	61.9	0.799	0.992	0.969	0.958
5	227	242,384,000	61.6	0.795	0.987	0.966	0.958
6	239	243,530,000	62.6	0.799	0.992	0.971	0.960
7	256	245,612,000	62.3	0.802	0.993	0.971	0.959
8	210	239,297,000	62.1	0.790	0.988	0.965	0.960
9	192	237,348,000	60.6	0.786	0.983	0.961	0.957
10	185	236,797,000	59.8	0.783	0.982	0.960	0.957

Tabela A.28 - Resultado da aplicação do método PROMETHEE aos dados gerados para a rede do Bessa utilizando os critérios da Simulação 5

Class	Altern	FO1 (UMT)	FO2 (l/s)	FO5	FO6	FO7	FO8
1	206	238,789,000	60.7	0.788	0.990	0.965	0.959
2	302	247,270,000	60.2	0.795	0.981	0.958	0.959
3	256	245,612,000	62.3	0.802	0.993	0.971	0.959
4	307	247,270,000	60.2	0.795	0.981	0.958	0.959
5	255	245,302,000	63.5	0.803	0.993	0.975	0.962
6	239	243,530,000	62.6	0.799	0.992	0.971	0.960
7	284	247,270,000	60.2	0.795	0.981	0.958	0.959
8	189	237,005,000	59.9	0.784	0.986	0.960	0.956
9	251	245,108,000	61.9	0.799	0.992	0.969	0.958
10	199	237,903,000	60.7	0.786	0.985	0.963	0.957

Tabela A.29 - Resultado da aplicação do método ELECTRE III aos dados gerados para a rede do Bessa utilizando os critérios da Simulação 6

Class	Altern	FO1 (UMT)	FO2 (l/s)	FO5	FO6	FO7	FO8
1	206	238,789,000	60.7	0.788	0.990	0.965	0.959
2	127	230,209,000	56.3	0.757	0.964	0.936	0.951
3	146	232,898,000	54.7	0.759	0.959	0.924	0.947
4	163	234,161,000	57.7	0.772	0.968	0.940	0.953
5	142	232,420,000	57.6	0.765	0.970	0.942	0.952
6	165	234,395,000	50.7	0.737	0.926	0.889	0.935
7	147	232,937,000	57.4	0.768	0.966	0.938	0.949
8	148	233,039,000	58.2	0.769	0.967	0.940	0.950
9	176	235,446,000	59.0	0.779	0.976	0.949	0.954
10	167	234,816,000	56.0	0.768	0.964	0.931	0.951

Tabela A.30 - Resultado da aplicação do método PROMETHEE aos dados gerados para a rede do Bessa utilizando os critérios da Simulação 6

Class	Altern	FO1 (UMT)	FO2 (l/s)	FO5	FO6	FO7	FO8
1	206	238,789,000	60.7	0.788	0.990	0.965	0.959
2	210	239,297,000	62.1	0.790	0.988	0.965	0.960
3	255	245,302,000	63.5	0.803	0.993	0.975	0.962
4	203	238,288,000	60.3	0.787	0.984	0.957	0.959
5	363	247,270,000	60.2	0.795	0.981	0.958	0.959
6	302	247,270,000	60.2	0.795	0.981	0.958	0.959
7	250	244,876,000	62.4	0.801	0.992	0.967	0.961
8	307	247,270,000	60.2	0.795	0.981	0.958	0.959
9	358	247,270,000	60.2	0.795	0.981	0.958	0.959
10	246	244,318,000	61.9	0.798	0.988	0.967	0.960

ANEXO A.4

Resultados da Otimização Multiobjetivo da Rede RF1

Tabela A.31 - Resultado da aplicação do método ELECTRE III aos dados gerados para a rede RF1 utilizando os critérios da Simulação 1

Class	Altern	FO1 (UMT)	FO2 (l/s)	FO3	FO4	FO6	FO7	FO8
1	199	446,550,000	228.7	25.423	0.383	0.958	0.983	0.834
2	177	441,037,000	220.6	25.877	0.338	0.939	0.973	0.825
3	195	445,994,000	221.7	26.214	0.336	0.941	0.969	0.819
4	139	437,214,000	220.7	25.238	0.358	0.962	0.987	0.848
5	152	438,505,000	216.6	25.440	0.344	0.938	0.970	0.828
6	201	447,459,000	247.3	25.583	0.411	0.973	0.990	0.862
7	118	434,715,000	219.3	25.554	0.336	0.956	0.989	0.830
8	146	438,140,000	211.0	26.066	0.322	0.938	0.967	0.833
9	213	450,610,000	222.4	26.195	0.337	0.946	0.974	0.820
10	184	442,057,000	225.1	25.152	0.370	0.957	0.985	0.853

Tabela A.32 - Resultado da aplicação do método PROMETHEE aos dados gerados para a rede RF1 utilizando os critérios da Simulação 1

Class	Altern	FO1 (UMT)	FO2 (l/s)	FO3	FO4	FO6	FO7	FO8
1	119	434,914,000	203.2	26.691	0.275	0.918	0.957	0.809
2	26	419,534,000	186.1	26.132	0.231	0.894	0.930	0.796
3	168	440,270,000	209.0	26.870	0.285	0.928	0.963	0.823
4	89	428,895,000	191.1	26.383	0.243	0.902	0.942	0.793
5	80	427,703,000	212.3	26.066	0.311	0.932	0.963	0.819
6	140	437,284,000	219.0	26.468	0.320	0.948	0.974	0.832
7	82	427,739,000	195.7	26.035	0.274	0.917	0.956	0.821
8	109	433,370,000	206.0	26.200	0.296	0.934	0.965	0.822
9	76	426,735,000	186.6	26.154	0.235	0.895	0.937	0.801
10	96	429,906,000	193.9	25.999	0.272	0.912	0.953	0.813

Tabela A.33 - Resultado da aplicação do método ELECTRE III aos dados gerados para a rede RF1 utilizando os critérios da Simulação 2

Class	Altern	FO1 (UMT)	FO2 (l/s)	FO3	FO4	FO6	FO7	FO8
1	139	437,214,000	220.7	25.238	0.358	0.962	0.987	0.848
2	186	442,972,000	226.2	25.410	0.357	0.968	0.990	0.817
3	118	434,715,000	219.3	25.554	0.336	0.956	0.989	0.830
4	199	446,550,000	228.7	25.423	0.383	0.958	0.983	0.834
5	184	442,057,000	225.1	25.152	0.370	0.957	0.985	0.853
6	108	433,340,000	228.9	24.686	0.389	0.965	0.985	0.842
7	201	447,459,000	247.3	25.583	0.411	0.973	0.990	0.862
8	86	428,339,000	221.8	25.047	0.345	0.958	0.978	0.830
9	106	432,576,000	232.3	24.877	0.399	0.955	0.979	0.848
10	105	432,542,000	234.2	24.794	0.388	0.962	0.978	0.846

Tabela A.34 - Resultado da aplicação do método PROMETHEE aos dados gerados para a rede RF1 utilizando os critérios da Simulação 2

Class	Altern	FO1 (UMT)	FO2 (l/s)	FO3	FO4	FO6	FO7	FO8
1	118	434,715,000	219.3	25.554	0.336	0.956	0.989	0.830
2	139	437,214,000	220.7	25.238	0.358	0.962	0.987	0.848
3	186	442,972,000	226.2	25.410	0.357	0.968	0.990	0.817
4	140	437,284,000	219.0	26.468	0.320	0.948	0.974	0.832
5	86	428,339,000	221.8	25.047	0.345	0.958	0.978	0.830
6	137	437,098,000	215.0	25.710	0.322	0.951	0.979	0.842
7	19	418,233,000	203.6	25.193	0.313	0.934	0.968	0.835
8	64	424,371,000	215.6	24.309	0.358	0.960	0.981	0.828
9	108	433,340,000	228.9	24.686	0.389	0.965	0.985	0.842
10	150	438,482,000	213.1	25.875	0.323	0.943	0.979	0.813

Tabela A.35 - Resultado da aplicação do método ELECTRE III aos dados gerados para a rede RF1 utilizando os critérios da Simulação 3

Class	Altern	FO1 (UMT)	FO2 (l/s)	FO3	FO4	FO6	FO7	FO8
1	184	442,057,000	225.1	25.152	0.370	0.957	0.985	0.853
2	127	435,948,000	223.2	23.710	0.398	0.952	0.974	0.781
3	146	438,140,000	211.0	26.066	0.322	0.938	0.967	0.833
4	163	439,533,000	194.4	25.365	0.274	0.914	0.961	0.829
5	142	437,493,000	194.3	24.463	0.290	0.910	0.960	0.762
6	165	439,668,000	207.7	25.193	0.321	0.939	0.975	0.814
7	147	438,198,000	231.4	23.698	0.418	0.963	0.983	0.842
8	148	438,285,000	245.8	22.800	0.475	0.977	0.992	0.807
9	176	440,925,000	237.7	21.495	0.471	0.891	0.922	0.739
10	167	440,101,000	226.4	23.714	0.402	0.951	0.968	0.829

Tabela A.36 - Resultado da aplicação do método PROMETHEE aos dados gerados para a rede RF1 utilizando os critérios da Simulação 3

Class	Altern	FO1 (UMT)	FO2 (l/s)	FO3	FO4	FO6	FO7	FO8
1	3	407,643,000	184.6	24.586	0.248	0.908	0.945	0.825
2	247	457,828,000	267.5	24.162	0.496	0.986	0.995	0.886
3	242	456,907,000	267.1	24.597	0.491	0.983	0.998	0.882
4	78	427,523,000	212.3	25.010	0.337	0.945	0.976	0.843
5	184	442,057,000	225.1	25.152	0.370	0.957	0.985	0.853
6	71	425,108,000	214.3	23.848	0.360	0.953	0.973	0.842
7	19	418,233,000	203.6	25.193	0.313	0.934	0.968	0.835
8	179	441,243,000	214.3	25.618	0.329	0.938	0.965	0.849
9	48	422,937,000	212.6	24.629	0.333	0.946	0.969	0.840
10	51	423,132,000	208.6	25.157	0.323	0.941	0.966	0.838

Tabela A.37 - Resultado da aplicação do método ELECTRE III aos dados gerados para a rede RF1 utilizando os critérios da Simulação 4

Class	Altern	FO1 (UMT)	FO2 (l/s)	FO5	FO6	FO7	FO8
1	193	428,367,000	227.6	0.421	0.962	0.979	0.928
2	192	427,745,000	220.8	0.419	0.959	0.975	0.925
3	236	440,529,000	258.2	0.425	0.964	0.979	0.937
4	244	441,576,000	252.0	0.426	0.958	0.974	0.921
5	173	423,427,000	213.8	0.417	0.957	0.974	0.924
6	254	446,644,000	256.5	0.429	0.960	0.976	0.921
7	206	432,026,000	245.7	0.419	0.954	0.973	0.920
8	255	446,984,000	255.2	0.429	0.961	0.977	0.924
9	243	441,198,000	249.2	0.424	0.961	0.978	0.926
10	221	435,379,000	244.6	0.420	0.958	0.974	0.929

Tabela A.38 - Resultado da aplicação do método PROMETHEE aos dados gerados para a rede RF1 utilizando os critérios da Simulação 4

Class	Altern	FO1 (UMT)	FO2 (l/s)	FO5	FO6	FO7	FO8
1	193	428,367,000	227.6	0.421	0.962	0.979	0.928
2	173	423,427,000	213.8	0.417	0.957	0.974	0.924
3	192	427,745,000	220.8	0.419	0.959	0.975	0.925
4	206	432,026,000	245.7	0.419	0.954	0.973	0.920
5	236	440,529,000	258.2	0.425	0.964	0.979	0.937
6	202	430,651,000	246.8	0.418	0.957	0.976	0.920
7	244	441,576,000	252.0	0.426	0.958	0.974	0.921
8	180	424,974,000	237.5	0.413	0.953	0.972	0.916
9	198	430,299,000	248.4	0.416	0.966	0.981	0.924
10	254	446,644,000	256.5	0.429	0.960	0.976	0.921

Tabela A.39 - Resultado da aplicação do método ELECTRE III aos dados gerados para a rede RF1 utilizando os critérios da Simulação 5

Class	Altern	FO1 (UMT)	FO2 (l/s)	FO5	FO6	FO7	FO8
1	193	428,367,000	227.6	0.421	0.962	0.979	0.928
2	192	427,745,000	220.8	0.419	0.959	0.975	0.925
3	173	423,427,000	213.8	0.417	0.957	0.974	0.924
4	224	435,600,000	243.2	0.420	0.960	0.979	0.924
5	198	430,299,000	248.4	0.416	0.966	0.981	0.924
6	243	441,198,000	249.2	0.424	0.961	0.978	0.926
7	229	437,472,000	243.8	0.421	0.959	0.977	0.921
8	236	440,529,000	258.2	0.425	0.964	0.979	0.937
9	234	438,423,000	242.0	0.421	0.958	0.976	0.925
10	202	430,651,000	246.8	0.418	0.957	0.976	0.920

Tabela A.40 - Resultado da aplicação do método PROMETHEE aos dados gerados para a rede RF1 utilizando os critérios da Simulação 5

Class	Altern	FO1 (UMT)	FO2 (l/s)	FO5	FO6	FO7	FO8
1	193	428,367,000	227.6	0.421	0.962	0.979	0.928
2	287	457,220,000	253.4	0.430	0.959	0.976	0.930
3	173	423,427,000	213.8	0.417	0.957	0.974	0.924
4	198	430,299,000	248.4	0.416	0.966	0.981	0.924
5	192	427,745,000	220.8	0.419	0.959	0.975	0.925
6	281	457,220,000	253.4	0.430	0.959	0.976	0.930
7	224	435,600,000	243.2	0.420	0.960	0.979	0.924
8	236	440,529,000	258.2	0.425	0.964	0.979	0.937
9	243	441,198,000	249.2	0.424	0.961	0.978	0.926
10	365	457,220,000	253.4	0.430	0.959	0.976	0.930

Tabela A.41 - Resultado da aplicação do método ELECTRE III aos dados gerados para a rede RF1 utilizando os critérios da Simulação 6

Class	Altern	FO1 (UMT)	FO2 (l/s)	FO5	FO6	FO7	FO8
1	236	440,529,000	258.2	0.425	0.964	0.979	0.937
2	127	413,348,000	225.1	0.404	0.949	0.970	0.912
3	146	416,921,000	214.9	0.395	0.944	0.964	0.900
4	163	420,773,000	215.0	0.397	0.937	0.962	0.895
5	142	415,818,000	227.3	0.405	0.951	0.972	0.917
6	165	421,244,000	230.6	0.409	0.946	0.967	0.919
7	147	416,950,000	233.4	0.405	0.951	0.972	0.916
8	148	418,145,000	226.5	0.407	0.943	0.964	0.907
9	176	424,021,000	231.0	0.409	0.947	0.967	0.916
10	167	422,302,000	213.8	0.396	0.936	0.959	0.887

Tabela A.42 - Resultado da aplicação do método PROMETHEE aos dados gerados para a rede RF1 utilizando os critérios da Simulação 6

Class	Altern	FO1 (UMT)	FO2 (l/s)	FO5	FO6	FO7	FO8
1	365	457,220,000	253.4	0.430	0.959	0.976	0.930
2	236	440,529,000	258.2	0.425	0.964	0.979	0.937
3	193	428,367,000	227.6	0.421	0.962	0.979	0.928
4	474	457,220,000	253.4	0.430	0.959	0.976	0.930
5	173	423,427,000	213.8	0.417	0.957	0.974	0.924
6	359	457,220,000	253.4	0.430	0.959	0.976	0.930
7	192	427,745,000	220.8	0.419	0.959	0.975	0.925
8	420	457,220,000	253.4	0.430	0.959	0.976	0.930
9	300	457,220,000	253.4	0.430	0.959	0.976	0.930
10	221	435,379,000	244.6	0.420	0.958	0.974	0.929

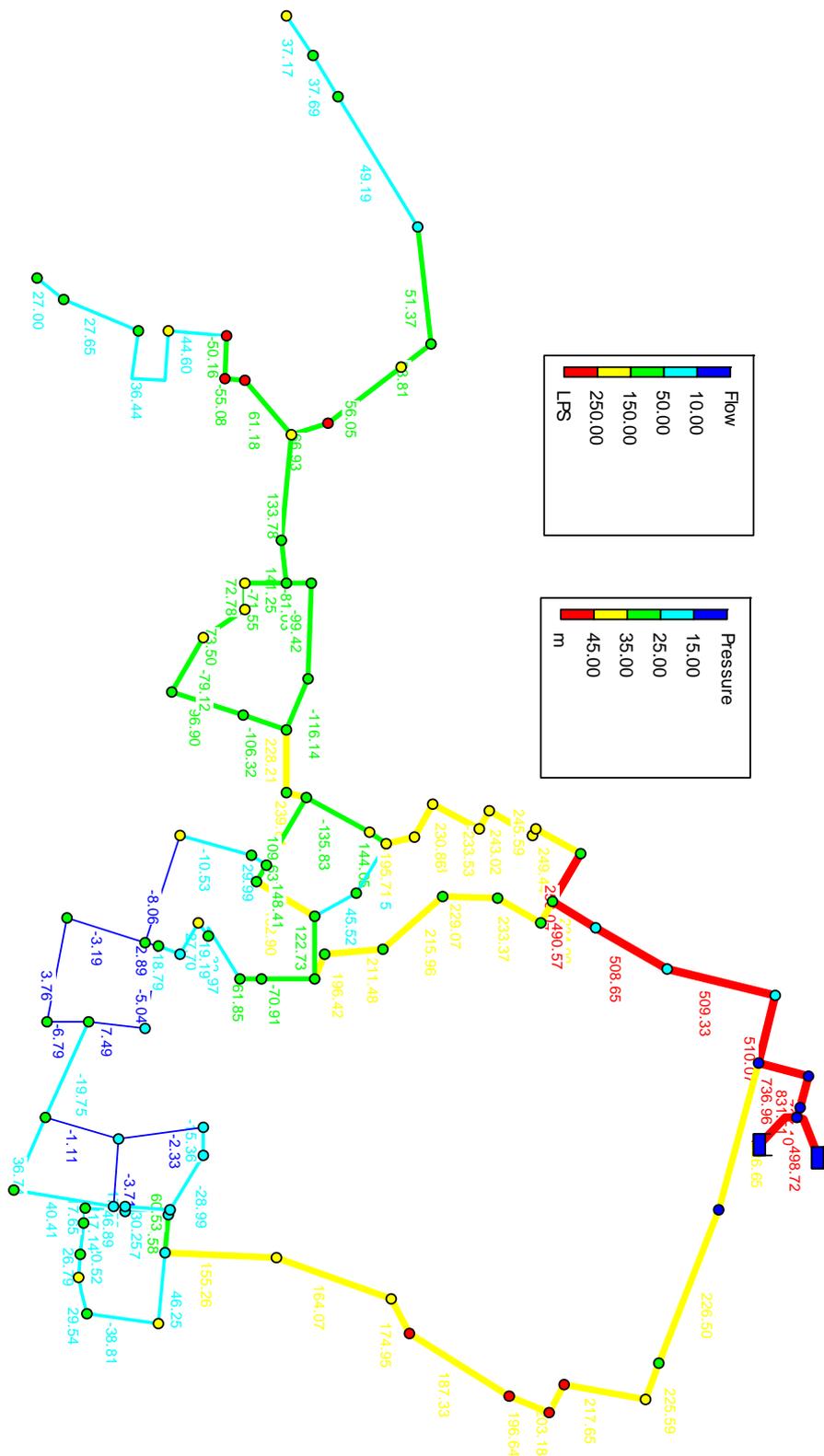


Figura A.12 - Distribuição das vazões nos trechos (l/s) da rede RF1 considerando a alternativa 184 obtida para as Simulações 1, 2 e 3.

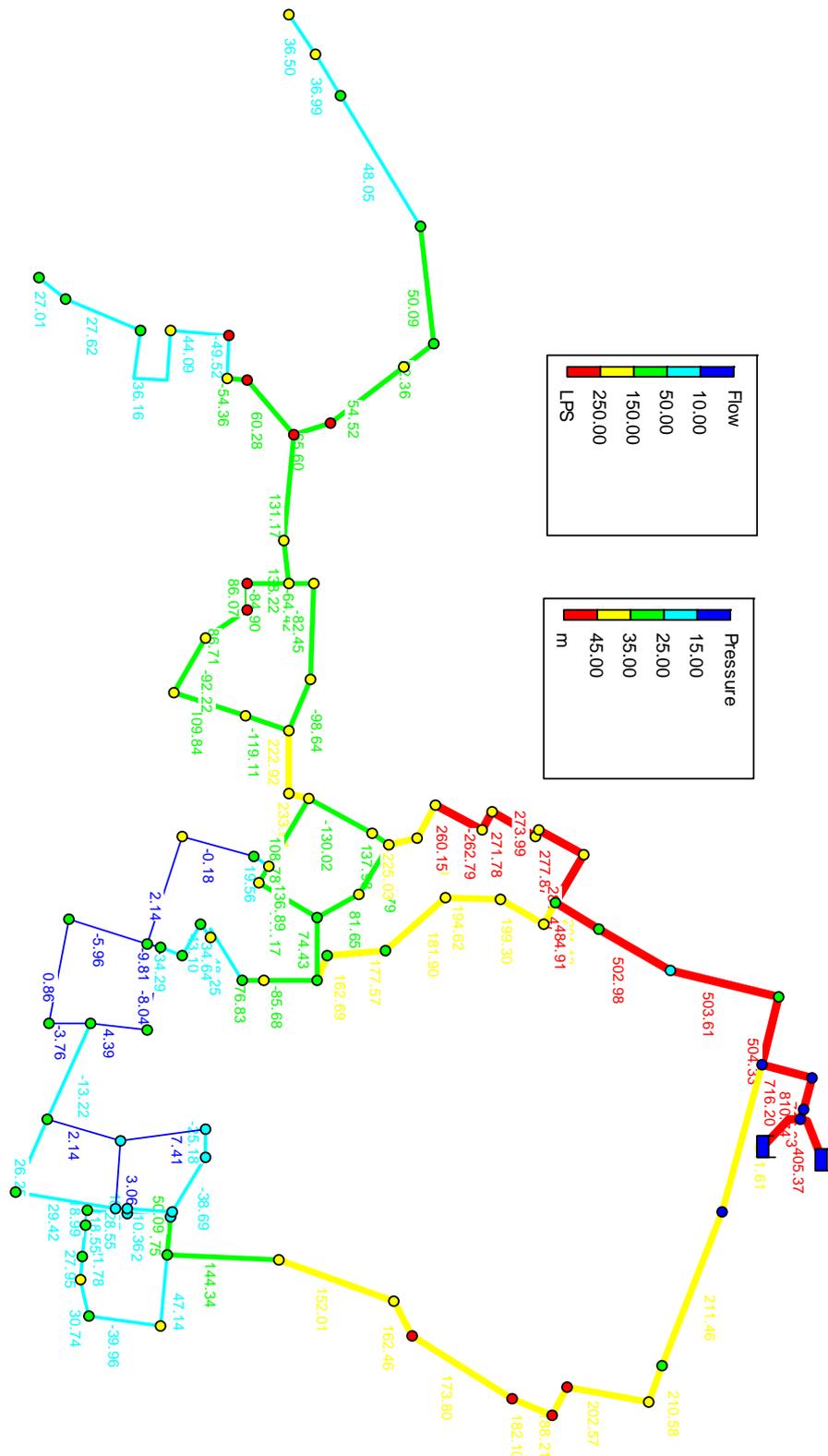


Figura A.13 - Distribuição das vazões nos trechos (l/s) da rede RF1 considerando a alternativa 199 obtida para as Simulações 1, 2 e 3.

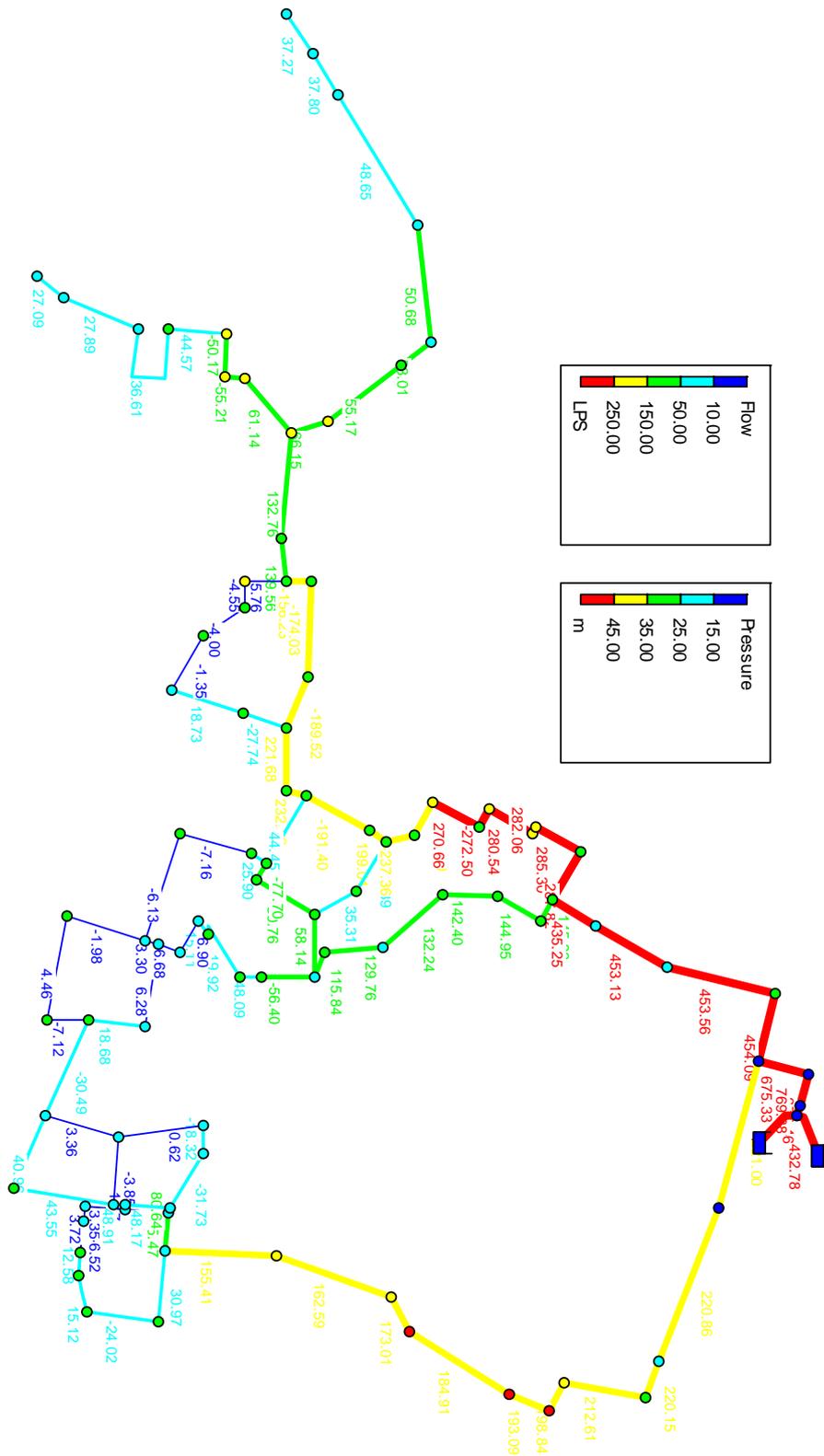
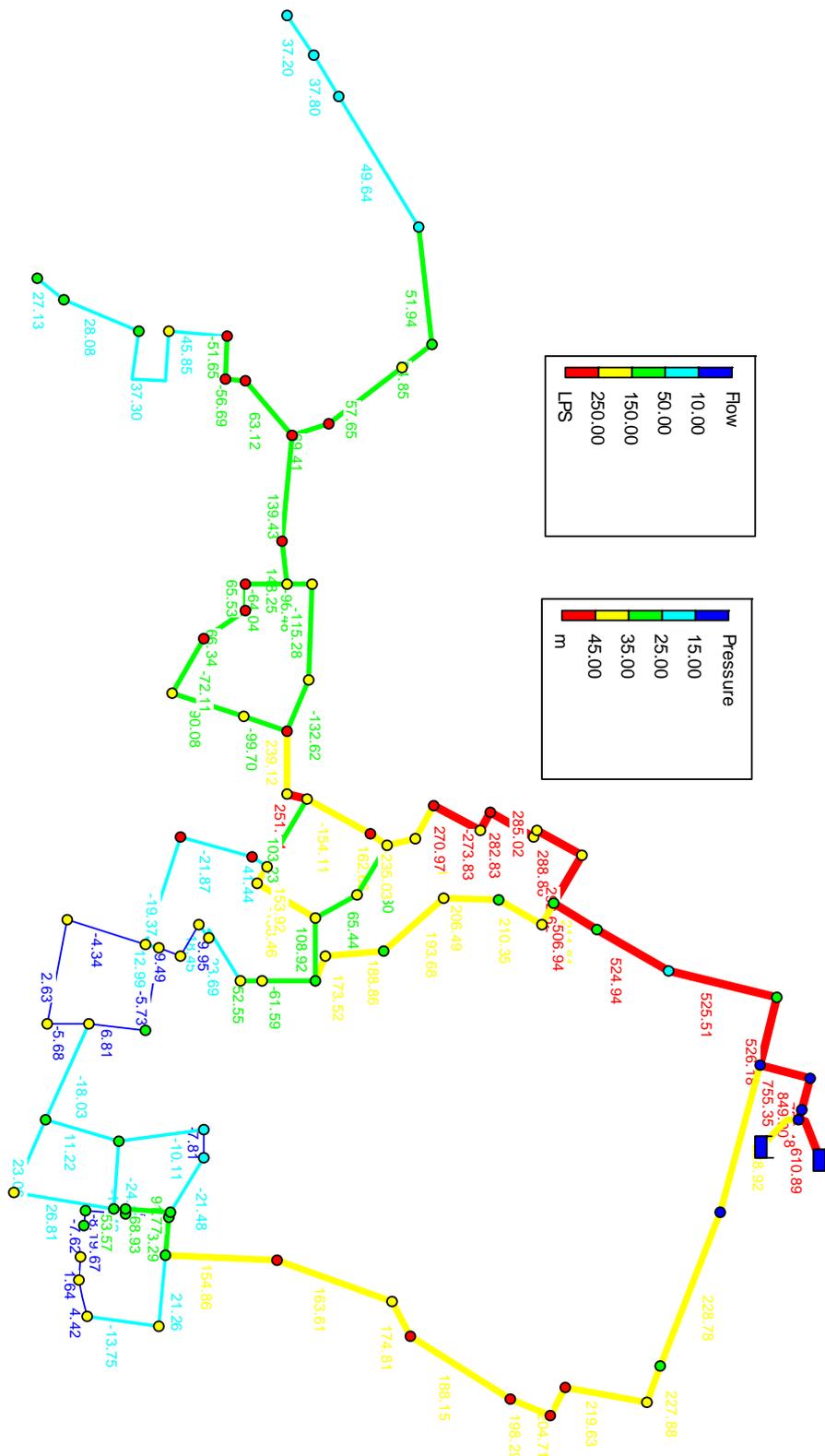


Figura A.14 - Distribuição das vazões nos trechos (l/s) da rede RF1 considerando a alternativa 1 obtida para as Simulações 4, 5 e 6.



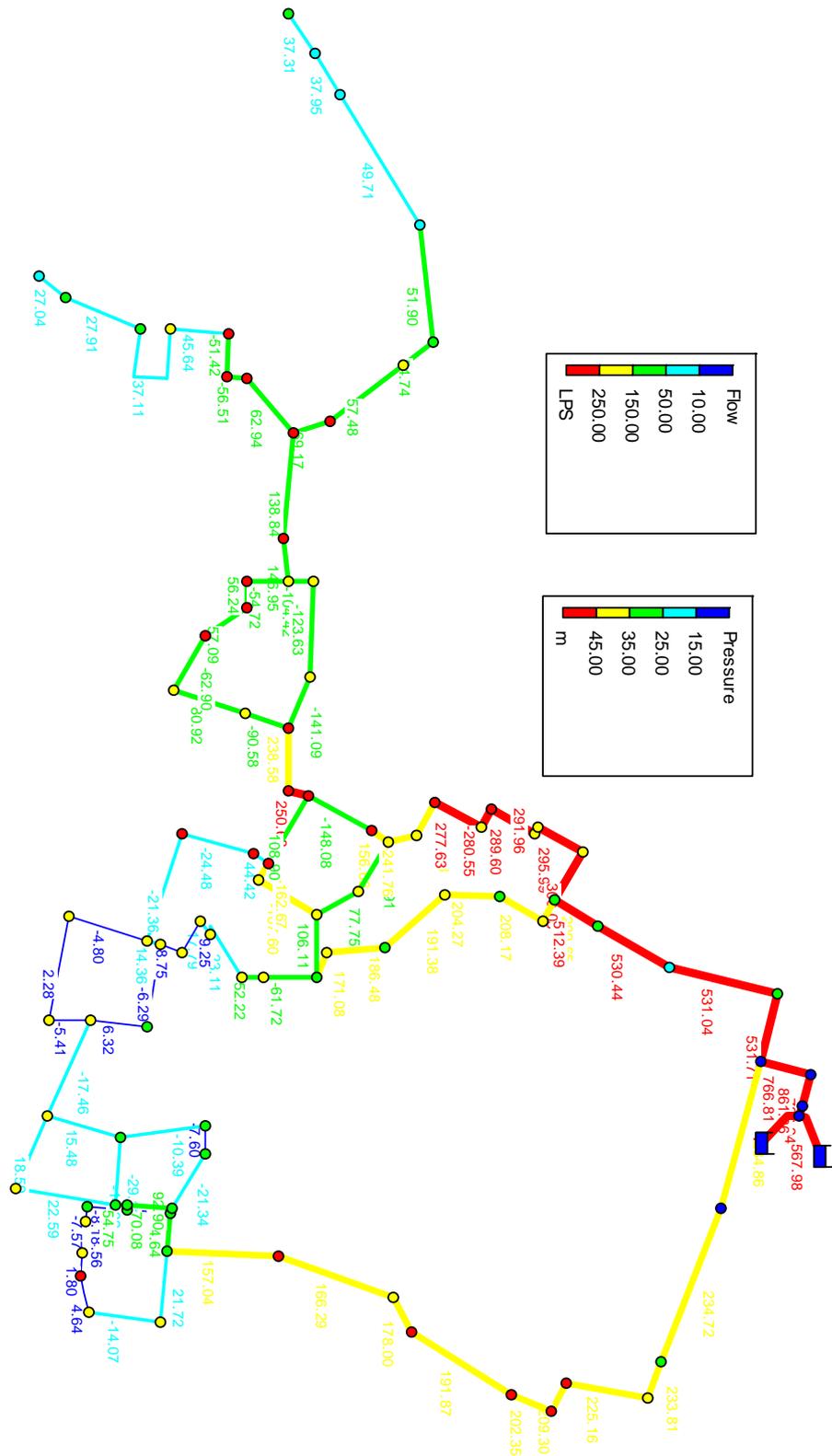


Figura A.17 - Distribuição das vazões nos trechos (l/s) da rede RF1 considerando a alternativa 236 obtida para as Simulações 4, 5 e 6.

ANEXO A.5

Resultados da Otimização Multiobjetivo da Rede RF1 com
Locação de Válvulas Redutoras de Pressão

Tabela A.43 - Resultado da aplicação do método ELECTRE III aos dados gerados para a rede RF1 utilizando os critérios da Simulação 4

Class	Altern	FO1 (UMT)	FO2 (l/s)	FO5	FO6	FO7	FO8
1	236	470.439.000	117,1	0,335	0,997	1,000	0,887
2	251	476.852.000	118,0	0,343	0,997	1,000	0,893
3	227	466.799.000	114,7	0,325	0,996	1,000	0,893
4	262	484.457.000	117,1	0,349	0,998	1,000	0,895
5	252	477.109.000	124,1	0,346	0,997	1,000	0,888
6	248	476.394.000	121,4	0,339	0,997	1,000	0,889
7	256	480.918.000	120,8	0,345	0,997	1,000	0,890
8	224	465.529.000	122,8	0,329	0,995	1,000	0,883
9	271	485.982.000	119,3	0,351	0,998	1,000	0,895
10	241	474.293.000	115,4	0,329	0,998	1,000	0,887

Tabela A.44 - Resultado da aplicação do método PROMETHEE aos dados gerados para a rede RF1 utilizando os critérios da Simulação 4

Class	Altern	FO1 (UMT)	FO2 (l/s)	FO5	FO6	FO7	FO8
1	227	466.799.000	114,7	0,325	0,996	1,000	0,893
2	236	470.439.000	117,1	0,335	0,997	1,000	0,887
3	251	476.852.000	118,0	0,343	0,997	1,000	0,893
4	251	476.852.000	118,0	0,343	0,997	1,000	0,893
5	254	478.559.000	109,1	0,328	0,996	1,000	0,883
6	192	457.154.000	114,7	0,313	0,996	1,000	0,890
7	245	475.310.000	108,7	0,322	0,998	1,000	0,887
8	217	463.517.000	111,0	0,313	0,994	1,000	0,886
9	221	465.062.000	113,0	0,317	0,986	0,992	0,864
10	305	491.531.000	118,0	0,350	0,998	1,000	0,889

Tabela A.45 - Resultado da aplicação do método ELECTRE III aos dados gerados para a rede RF1 utilizando os critérios da Simulação 5

Class	Altern	FO1 (UMT)	FO2 (l/s)	FO5	FO6	FO7	FO8
1	251	476.852.000	118,0	0,343	0,997	1,000	0,893
2	227	466.799.000	114,7	0,325	0,996	1,000	0,893
3	236	470.439.000	117,1	0,335	0,997	1,000	0,887
4	227	466.799.000	114,7	0,325	0,996	1,000	0,893
5	196	457.391.000	116,2	0,313	0,995	1,000	0,872
6	208	460.180.000	116,3	0,315	0,995	1,000	0,876
7	236	470.439.000	117,1	0,335	0,997	1,000	0,887
8	217	463.517.000	111,0	0,313	0,994	1,000	0,886
9	173	452.743.000	115,5	0,299	0,995	1,000	0,875
10	226	466.584.000	116,0	0,320	0,996	1,000	0,878

Tabela A.46 - Resultado da aplicação do método PROMETHEE aos dados gerados para a rede RF1 utilizando os critérios da Simulação 5

Class	Altern	FO1 (UMT)	FO2 (l/s)	FO5	FO6	FO7	FO8
1	227	466.799.000	114,7	0,325	0,996	1,000	0,893
2	192	457.154.000	114,7	0,313	0,996	1,000	0,890
3	236	470.439.000	117,1	0,335	0,997	1,000	0,887
4	182	454.852.000	111,3	0,291	0,992	1,000	0,867
5	173	452.743.000	115,5	0,299	0,995	1,000	0,875
6	103	430.233.000	119,4	0,272	0,987	0,998	0,847
7	171	452.381.000	111,3	0,288	0,989	0,999	0,864
8	196	457.391.000	116,2	0,313	0,995	1,000	0,872
9	181	454.438.000	113,4	0,297	0,991	1,000	0,871
10	234	470.038.000	110,5	0,318	0,998	1,000	0,894

Tabela A.47 - Resultado da aplicação do método ELECTRE III aos dados gerados para a rede RF1 utilizando os critérios da Simulação 6

Class	Altern	FO1 (UMT)	FO2 (l/s)	FO5	FO6	FO7	FO8
1	236	470.439.000	117,1	0,335	0,997	1,000	0,887
2	227	466.799.000	114,7	0,325	0,996	1,000	0,893
3	146	445.267.000	113,8	0,275	0,979	0,992	0,857
4	163	450.760.000	123,6	0,306	0,983	0,995	0,862
5	142	444.950.000	122,9	0,299	0,990	0,999	0,860
6	165	451.336.000	133,6	0,320	0,991	0,998	0,874
7	147	445.386.000	127,4	0,301	0,977	0,988	0,852
8	148	447.761.000	124,2	0,306	0,991	0,999	0,868
9	176	453.600.000	129,9	0,316	0,991	0,999	0,881
10	167	451.694.000	171,0	0,321	0,992	0,999	0,879

Tabela A.48 - Resultado da aplicação do método PROMETHEE aos dados gerados para a rede RF1 utilizando os critérios da Simulação 6

Class	Altern	FO1 (UMT)	FO2 (l/s)	FO5	FO6	FO7	FO8
1	236	470.439.000	117,1	0,335	0,997	1,000	0,887
2	227	466.799.000	114,7	0,325	0,996	1,000	0,893
3	251	476.852.000	118,0	0,343	0,997	1,000	0,893
4	306	491.531.000	118,0	0,350	0,998	1,000	0,889
5	286	491.531.000	118,0	0,350	0,998	1,000	0,889
6	159	449.902.000	111,5	0,286	0,986	0,997	0,881
7	227	466.799.000	114,7	0,325	0,996	1,000	0,893
8	251	476.852.000	118,0	0,343	0,997	1,000	0,893
9	266	485.298.000	109,7	0,333	1,000	1,000	0,901
10	305	491.531.000	118,0	0,350	0,998	1,000	0,889

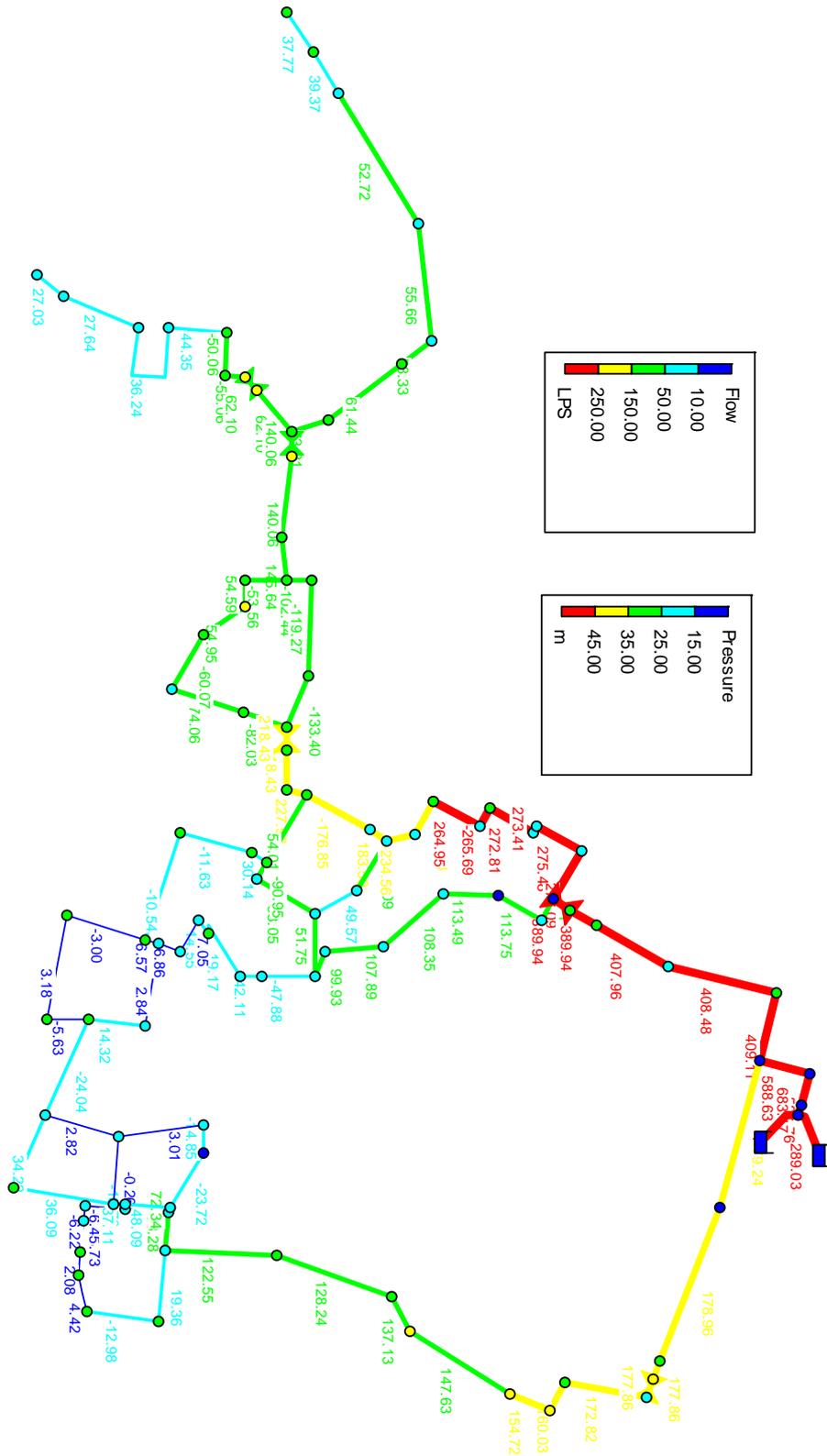


Figura A.19 - Distribuição das vazões nos trechos (l/s) da rede RF1 com locação de válvulas, considerando a alternativa 227 obtida para as Simulações 4, 5 e 6.

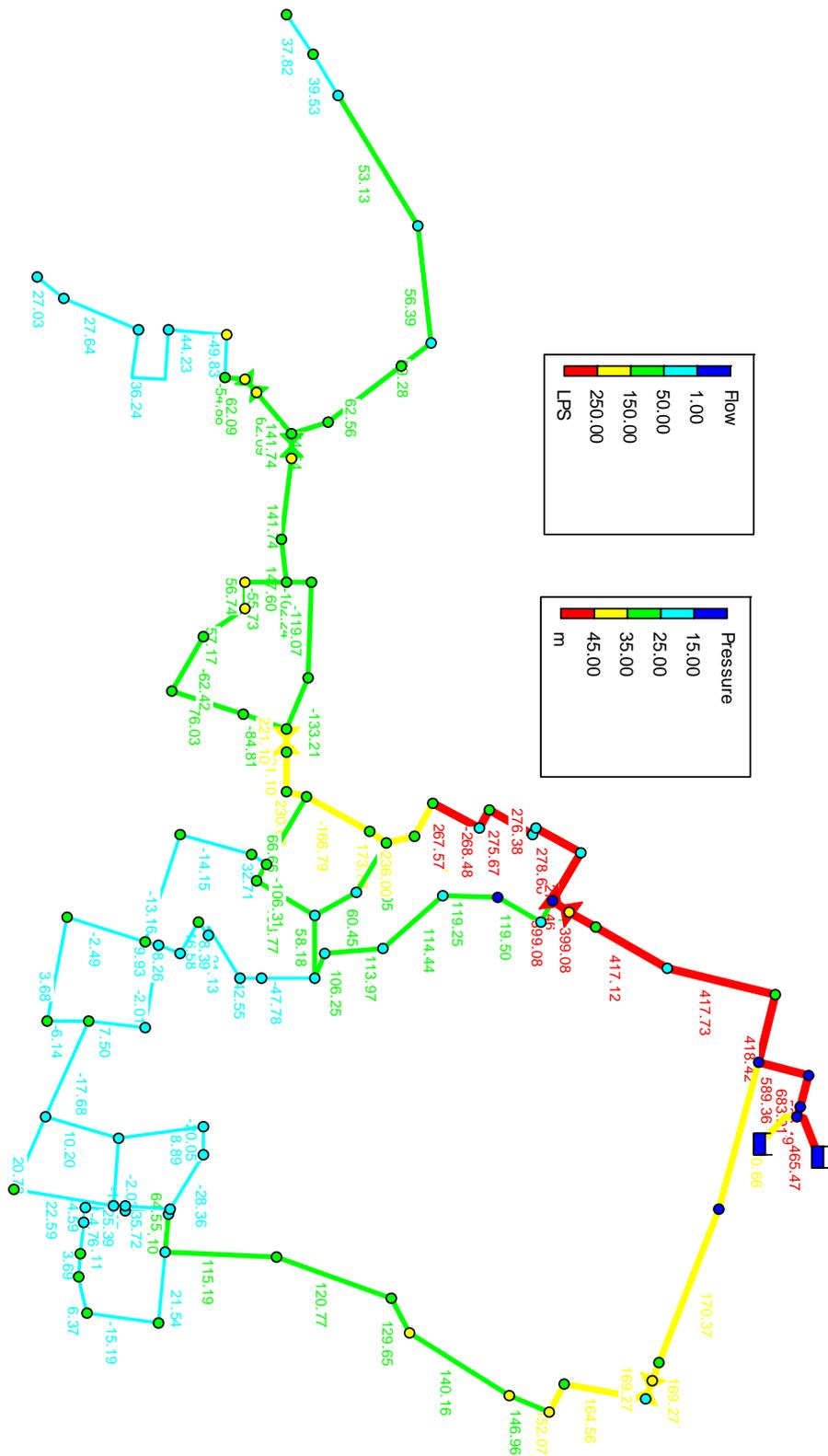


Figura A.21- Distribuição das vazões nos trechos (l/s) da rede RF1 com locação de válvulas, considerando a alternativa 251 obtida para as Simulações 4, 5 e 6.